

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**



**Grado en Tecnologías y Sistemas de Telecomunicación**

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

**ANTENAS MULTIBANDA DE WLAN Y WIMAX**

**Autor: Juan Camilo Cardona Arias**

**Tutor: Bazil Taha Ahmed**

**Junio 2021**



# **ANTENAS MULTIBANDA DE WLAN Y WIMAX**

**AUTOR: Juan Camilo Cardona Arias**  
**TUTOR: Bazil Taha Ahmed**

**Grupo de Radiofrecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas**  
**Dpto. de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones**  
**Escuela Politécnica Superior**  
**Universidad Autónoma de Madrid**  
**Junio 2021**



# Resumen

Para abordar este trabajo de fin de grado, se realiza el estudio teórico de las antenas para posteriormente realizar el diseño de varias antenas utilizando la tecnología MIMO. Para empezar, mediante la tecnología microstrip se realiza el diseño de las distintas antenas, alimentados todos ellos por línea microstrip con alimentación directa al que al final se le soldará un conector tipo SMA para poder realizar las mediciones oportunas.

En primer lugar, se realiza el diseño de una antena formada por un único elemento que, siguiendo unas especificaciones de diseño será capaz de trabajar en tres bandas distintas. Estas bandas han sido elegidas para poder utilizar la tecnología Wi-Fi, WiMAX y comunicaciones 5G, de las cuales se hablará con detalle en el capítulo teórico de este trabajo fin de grado.

Se prosigue con el diseño y se implementa una antena MIMO formada por dos elementos, se tiene como base de diseño la antena anterior a la que se le aplica un espejo, para posteriormente variar sus longitudes y así poder conseguir las especificaciones de diseño. Se realiza un análisis de los parámetros S de la antena MIMO en los que se puede observar que los coeficientes de acoplamiento no están cumpliendo los requerimientos especificados, por ello, se parte de este diseño y se implementan unas barreras metálicas verticales y horizontales con el objetivo de mejorar el acoplamiento entre puertos.

Para finalizar, el diseño de la antena MIMO formada por cuatro elementos sigue las mismas directrices que antes, se tiene como base la antena MIMO de dos elementos y se le aplica un espejo, se modifican las longitudes y se observan los parámetros. Para esta antena ocurre lo mismo que antes, los coeficientes de acoplamientos no son los deseados y se tienen que volver a implementar barreras metálicas.

Tras terminar la etapa de diseño pasamos a construir y medir las antenas, se exportan los archivos gerber y se envían a los laboratorios de la EPS para su fabricación, se sueldan los conectores tipo SMA con la fuente de alimentación de las antenas y se miden los resultados a través del analizador de redes perteneciente a la Escuela Politécnica Superior.

En la etapa final del trabajo fin de grado, se realiza un análisis comparativo entre los resultados medidos teóricamente por el programa CST STUDIO, el que se ha utilizado para el diseño, y los resultados que ha arrojado el analizador de redes de las distintas antenas que se han fabricado.

# Abstract

To tackle this final degree project, the theoretical study of the antennas is carried out to later carry out a design based on MIMO technology. To begin with, all the designs made are carried out using microstrip technology, all of them fed by a microstrip line to which an SMA-type connector will be welded at the end in order to make the appropriate measurements.

In the first place, the design of an antenna made up of a single element is carried out which, following design specifications, will be able to work in three different bands. These bands have been chosen to be able to use Wi-Fi, WiMAX and 5G communications technology, which will be discussed in detail in the theoretical chapter of this final degree project.

The design is continued and a MIMO antenna formed by two elements is implemented, the design basis is the previous antenna to which a mirror is applied, to later vary its lengths and thus be able to achieve the design specifications. After observing the S parameters of the MIMO antenna, it is obvious that the coupling coefficients are not meeting the specified requirements, therefore, it is based on this design and vertical and horizontal metal barriers are implemented to improve the coupling between ports.

Finally, the design of the MIMO antenna consisting of four elements follows the same guidelines as before, it is based on the two-element MIMO antenna and a mirror is applied to it, the lengths are modified and the parameters are observed. For this antenna, the same thing happens as before, the coupling coefficients are not what we want and metallic barriers have to be re-implemented.

After finishing the design stage, we go on to build and measure the antennas, the gerber files are exported and sent to the EPS laboratories for their manufacture, the SMA connectors are soldered with the antennas power supply and the results through the network analyzer belonging to the EPS.

To conclude this final degree project, a comparative analysis is carried out between the results theoretically measured by the CST STUDIO program, which has been used for the design, and the results obtained by the network analyzer of the manufactured antennas.

## **Palabras clave**

MIMO, antena, parámetros S, Wi-Fi, WiMAX, microstrip, reflexión, acoplamiento.

## **Keywords**

MIMO, antenna, S parameters, Wi-Fi, WiMAX, microstrip, reflection, coupling





## *Agradecimientos*

Con el final de este trabajo de fin de grado termina una etapa muy gratificante en mi vida, en la que he podido aprender, experimentar y disfrutar al máximo cada momento. Tengo que reconocer que no ha sido nada fácil llegar hasta este punto, teleco es una carrera muy bonita pero también muy dura, que me ha traído muchos dolores de cabeza, pero que también me ha servido para cambiar mi forma de ver la vida, de organizarme y de cuestionarme todo lo que hago. Ahora comienzo una nueva etapa que da aún más miedo que esto, más miedo que haberme metido en esta locura de ingeniería, aunque creo que gracias a ello tendré más posibilidades de afrontar todo lo que se venga.

Quería agradecer principalmente a mis padres, Olimpo y Myriam, que siempre han creído en mí, siempre me han apoyado, siempre han sabido aconsejarme y, sobre todo, han sabido aguantarme. Por supuesto, a mi hermana Laura, por sacarme siempre una sonrisa cuando más lo he necesitado, por hacerme todos estos años más pasajeros.

También quería agradecer a Bazil, mi tutor de TFG, por darme siempre la oportunidad de retomar este trabajo, de poder contar con su ayuda siempre que lo he necesitado y gracias por haber podido corregir todos los borradores en tiempo récord.

Por último, a todas y cada una de las personas que han hecho que esta experiencia haya sido tan gratificante, porque todos lo sabemos qué terminar esta carrera no sería posible sin esas tardes en la cafetería, sin esos apuntes de última hora, sin esas risas y esos momentos que siempre me quedarán. Gracias a Georgi, que ha sido la persona que más horas he tenido que aguantar, a Dominic, a la Chusita, Vergesito y Matu entre otros muchos, sé que me llevo una amistad eterna.



# INDICE DE CONTENIDOS

1.	Introducción.....	1
1.1.	Motivación del proyecto .....	1
1.2.	Objetivos y enfoque .....	1
1.3.	Organización de la memoria .....	2
2.	Conceptos teóricos.....	3
2.1.	Antena .....	3
2.2.	Parámetros .....	4
2.2.1.	Intensidad de radiación .....	4
2.2.2.	Impedancia de entrada .....	4
2.2.3.	Diagramas de radiación .....	5
2.2.4.	Directividad .....	6
2.2.5.	Ganancia .....	6
2.2.6.	Polarización .....	7
2.2.7.	Ancho de banda .....	7
2.2.8.	Eficiencia .....	8
2.2.9.	Parámetros S .....	8
2.3.	Tecnología antenas MIMO .....	9
2.4.	Tecnología microstrip .....	10
2.4.1.	Técnica de alimentación microstrip.....	10
2.5.	Tecnología Wi-Fi.....	13
2.6.	Tecnología WiMAX .....	13
3.	Criterios de diseño .....	14
3.1.	Introducción .....	14
3.2.	Tamaño de las antenas y el substrato .....	14
3.3.	Bandas de trabajo, acoplamiento y reflexión de la antena.....	14
4.	Diseño de la antena.....	16
4.1.	Introducción .....	16
4.2.	Antena formada por un elemento.....	16
4.3.	Antena formada por dos elementos.....	19
4.3.1.	Antena formada por dos elementos sin barreras.....	20
4.3.2.	Antena formada por dos elementos con barreras.....	22
4.4.	Antena formada por cuatro elementos .....	25
4.4.1.	Antena formada por cuatro elementos sin barreras .....	25
4.4.2.	Antena formada por cuatro elementos con barreras .....	28

5.	Resultados prácticos: construcción y medida de las antenas.....	33
5.1.	Construcción de las antenas .....	33
5.2.	Medida de las antenas .....	34
6.	Conclusiones y trabajo futuro.....	38
6.1.	Conclusiones.....	38
6.2.	Trabajo futuro .....	39
7.	Referencias .....	40
8.	Anexos.....	41
8.1.	Diagramas de radiación .....	41
8.1.1.	Diagramas de radiación para antena de un elemento .....	41
8.1.2.	Diagramas de radiación antena de dos elementos sin barreras.....	44
8.1.3.	Diagramas de radiación antena de dos elementos con barreras.....	48
8.1.4.	Diagramas de radiación antena de cuatro elementos sin barreras .....	51
8.1.5.	Diagramas de radiación antena de cuatro elementos con barreras .....	54

# INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Antena transmisora y receptora. Referencia [4].....	3
Figura 2. Coordenadas esféricas. Referencia [5].....	4
Figura 3. Ejemplo diagrama espacial de radiación. Referencia [1].....	5
Figura 4. Diagramas de radiación. Referencia [4].....	6
Figura 5. Parámetros antenas, ancho de banda. Referencia [propia].....	7
Figura 6. Red lineal de n puertos. Referencia [6].....	8
Figura 7. Tecnología MIMO, emisión y recepción. Referencia [9]. ....	9
Figura 8. Estructura microstrip. Referencia [8].....	10
Figura 9. Alimentación por línea microstrip. Referencia [8]. ....	11
Figura 10. Alimentación por sonda coaxial. Referencia [8].....	11
Figura 11. Alimentación por proximidad. Referencia [8]. ....	12
Figura 12. Alimentación por ranura. Referencia [8]. ....	12
Figura 13. Componentes de una red Wi-Fi. Referencia [10].....	13
Figura 14. Antena de un elemento.....	16
Figura 15. Antena de un elemento acotada, “vista frontal”.....	17
Figura 16. Antena de un elemento acotada, “vista posterior”. ....	18
Figura 17. Antena de un elemento acotada, “vista lateral”. ....	18
Figura 18. $S(1,1)$ coeficiente de reflexión. ....	19
Figura 19. Antena de dos elementos sin barreras. ....	20
Figura 20. Antena de dos elementos sin barreras acotada, “vista frontal”. ....	20
Figura 21. Antena de dos elementos sin barreras acotada, “vista posterior”.....	20
Figura 22. $S(1,1)$ y $S(2,2)$ coeficientes de reflexión.....	21
Figura 23. $S(2,1)$ y $S(1,2)$ coeficientes de acoplamiento.....	22
Figura 24. Antena de dos elementos con barreras metálicas. ....	22
Figura 25. Antena de dos elementos con barreras metálicas acotada “vista frontal”. ....	23
Figura 26. Antena de dos elementos con barreras metálicas acotada “vista posterior”. ....	23
Figura 27. $S(1,1)$ y $S(2,2)$ coeficientes de reflexión.....	24
Figura 28. $S(2,1)$ y $S(1,2)$ coeficientes de acoplamiento.....	24
Figura 29. Antena de cuatro elementos sin barreras metálicas.....	25
Figura 30. Antena de cuatro elementos sin barreras metálicas acotada “frontal”. ....	26
Figura 31. Antena de cuatro elementos sin barreras metálicas acotada “vista posterior”. .....	26
Figura 32. $S(1,1)$ , $S(2,2)$ , $S(3,3)$ y $S(4,4)$ coeficientes de reflexión.....	27
Figura 33. $S(2,1)$ , $S(1,2)$ , $S(4,3)$ y $S(3,4)$ coeficientes de acoplamiento.....	27
Figura 34. $S(3,1)$ , $S(1,3)$ , $S(4,2)$ y $S(2,4)$ coeficientes de acoplamiento.....	28

Figura 35. $S(4,1)$ , $S(1,4)$ , $S(3,2)$ y $S(2,3)$ coeficientes de acoplamiento.....	28
Figura 36. Antena de cuatro elementos con barreras metálicas. ....	29
Figura 37. Antena de cuatro elementos con barreras metálicas acotada “vista frontal”. 30	
Figura 38. Antena de cuatro elementos con barreras metálicas acotada “vista posterior”. .....	30
Figura 39. $S(1,1)$ , $S(2,2)$ , $S(3,3)$ y $S(4,4)$ coeficientes de reflexión.....	31
Figura 40. $S(2,1)$ , $S(1,2)$ , $S(4,3)$ y $S(3,4)$ coeficientes de acoplamiento.....	31
Figura 41. $S(3,1)$ , $S(1,3)$ , $S(4,2)$ y $S(2,4)$ coeficientes de acoplamiento.....	31
Figura 42. $S(4,1)$ , $S(1,4)$ , $S(3,2)$ y $S(2,3)$ coeficientes de acoplamiento.....	32
Figura 43. Máquina de fresado de circuitos impresos. ....	33
Figura 44. Antena de un elemento vista frontal.....	33
Figura 45. Antena de un elemento vista posterior.....	33
Figura 46. MIMO de dos elementos vista frontal.....	34
Figura 47. MIMO de dos elementos vista posterior.....	34
Figura 48. MIMO de cuatro elementos vista frontal.....	34
Figura 49. MIMO de cuatro elementos vista posterior.....	34
Figura 50. Coeficiente de reflexión $S_{11}$ antena de un elemento, medida práctica y teórica. .....	35
Figura 51. Coeficientes de reflexión $S_{11}$ y $S_{22}$ antena de dos elementos, medida práctica y teórica. ....	35
Figura 52. Coeficientes de acoplamiento $S_{12}$ y $S_{21}$ antena de dos elementos, medida práctica y teórica.....	35
Figura 53. Coeficientes de reflexión $S_{11}$ , $S_{22}$ , $S_{33}$ y $S_{44}$ antena de cuatro elementos, medida práctica y teórica.....	36
Figura 54. Coeficientes de acoplamiento $S_{21}$ , $S_{12}$ , $S_{43}$ y $S_{34}$ antena de cuatro elementos, medida práctica y teórica.....	36
Figura 55. Coeficientes de acoplamiento $S_{31}$ , $S_{13}$ , $S_{42}$ y $S_{24}$ antena de cuatro elementos, medida práctica y teórica.....	36
Figura 56. Coeficientes de acoplamiento $S_{41}$ , $S_{14}$ , $S_{32}$ y $S_{23}$ antena de cuatro elementos, medida práctica y teórica.....	37
Figura 57. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de un elemento a 2.5 GHz.....	41
Figura 58. Representación polar de diagrama de radiación para antena de un elemento a 2.5 GHz. Planos E y H respectivamente. .....	41
Figura 59. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de un elemento a 3.5 GHz.....	42
Figura 60. Representación polar de diagrama de radiación para antena de un elemento a 3.5 GHz. Planos E y H respectivamente. .....	42
Figura 61. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de un elemento a 5.5 GHz.....	43

Figura 62. Representación polar de diagrama de radiación para antena de un elemento a 5.5 GHz. Planos E y H respectivamente. ....	43
Figura 63. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de dos elementos sin barrera a 2.5 GHz.....	44
Figura 64. Representación polar de diagrama de radiación para antena de dos elementos sin barrera a 2.5 GHz. Planos E y H respectivamente. ....	45
Figura 65. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de dos elementos sin barrera a 3.5 GHz.....	46
Figura 66. Representación polar de diagrama de radiación para antena de dos elementos sin barrera a 3.5 GHz. Planos E y H respectivamente. ....	46
Figura 67. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de dos elementos sin barrera a 5.5 GHz.....	47
Figura 68. Representación polar de diagrama de radiación para antena de dos elementos sin barrera a 5.5 GHz. Planos E y H respectivamente. ....	47
Figura 69. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de dos elementos con barrera a 2.5 GHz.....	48
Figura 70. Representación polar de diagrama de radiación para antena de dos elementos con barrera a 2.5 GHz. Planos E y H respectivamente.....	48
Figura 71. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de dos elementos con barrera a 3.5 GHz. ....	49
Figura 72. Representación polar de diagrama de radiación para antena de dos elementos con barrera a 3.5 GHz. Planos E y H respectivamente.....	49
Figura 73. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de dos elementos con barrera a 5.5 GHz.....	50
Figura 74. Representación polar de diagrama de radiación para antena de dos elementos con barrera a 5.5 GHz. Planos E y H respectivamente. ....	50
Figura 75. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos sin barrera a 2.5 GHz. ....	51
Figura 76. Representación polar de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos sin barrera a 2.5 GHz. Planos E y H respectivamente. ....	51
Figura 77. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos sin barrera a 3.5 GHz.....	52
Figura 78. Representación polar de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos sin barrera a 3.5 GHz. Planos E y H respectivamente. ....	52
Figura 79. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos sin barrera a 5.5 GHz. ....	53
Figura 80. Representación polar de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos sin barrera a 5.5 GHz. Planos E y H respectivamente. ....	53
Figura 81. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos con barrera a 2.5 GHz.....	54
Figura 82. Representación polar de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos con barrera a 2.5 GHz. Planos E y H respectivamente.....	54

Figura 83. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos con barrera a 3.5 GHz.....	55
Figura 84. Representación polar de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos con barrea a 3.5 GHz. Planos E y H respectivamente.....	55
Figura 85. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos con barrera a 5.5 GHz.....	56
Figura 86. Representación polar de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos con barrea a 5.5 GHz. Planos E y H respectivamente.....	56



## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros antenas, polarización. ....	7
Tabla 2. Parámetros S para red lineal de dos puertos. ....	9
Tabla 3. Dimensiones de las variables de la antena de un elemento. ....	19
Tabla 4. Dimensiones de las variables de la antena de dos elementos sin barreras. ....	21
Tabla 5. Dimensiones de las variables de la antena de dos elementos con barreras. ....	24
Tabla 6. Dimensiones de las variables de la antena de cuatro elementos sin barreras. ...	27
Tabla 7. Dimensiones de las variables de la antena de dos elementos con barreras. ....	30
Tabla 8. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 2.5 GHz antena de un elemento. ....	42
Tabla 9. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 3.5 GHz antena de un elemento. ....	43
Tabla 10. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 5.5 GHz antena de un elemento. ....	44
Tabla 11. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 2.5 GHz antena de dos elementos sin barrera. ....	45
Tabla 12. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 3.5 GHz antena de dos elementos sin barrera. ....	46
Tabla 13. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 5.5 GHz antena de dos elementos sin barrera. ....	47
Tabla 14. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 2.5 GHz antena de dos elementos con barrera. ....	49
Tabla 15. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 3.5 GHz antena de dos elementos con barrera. ....	50
Tabla 16. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 5.5 GHz antena de dos elementos con barrera. ....	51
Tabla 17. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 2.5 GHz antena de cuatro elementos sin barrera. ....	52
Tabla 18. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 3.5 GHz antena de cuatro elementos sin barrera. ....	53
Tabla 19. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 5.5 GHz antena de cuatro elementos sin barrera. ....	54
Tabla 20. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 2.5 GHz antena de cuatro elementos con barrera. ....	55
Tabla 21. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 3.5 GHz antena de cuatro elementos con barrera. ....	56
Tabla 22. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 5.5 GHz antena de cuatro elementos con barrera. ....	57



# 1. Introducción

## 1.1. *Motivación del proyecto*

Las WLAN actuales han tenido mucho éxito debido en gran parte a su bajo coste además de las funciones que aportan, sin embargo, la tasa de transferencia es todavía limitada en comparación con las LAN cableadas. Además, el rendimiento y alcance que nos proporcionan son aún bastante mejorables.

Hoy en día es muy común encontrarnos con dispositivos electrónicos que prescinden de la conectividad vía cable, que poco a poco se está perdiendo su uso frente a las nuevas tecnologías de conexiones inalámbricas. Un ejemplo claro son los dispositivos de última generación que, por su reducido tamaño, resulta más eficiente y cómodo incorporar una tarjeta Wi-Fi con varias antenas y tecnología MIMO.

MIMO es una tecnología que se basa en entradas y salidas múltiples, mejora las redes inalámbricas debido a que ofrece una mejor cobertura gracias a que emite o recibe señales inalámbricas simultáneamente con varias antenas. También es capaz de aprovechar los rebotes de la señal para aumentar la velocidad inalámbrica evitando así que estos mismos rebotes sean dañinos para la conexión. Es decir, MIMO puede potenciar el rendimiento de las señales inalámbricas aprovechando los diferentes caminos en los que es capaz de emitir o recibir sin necesidad de aumentar la potencia o el ancho de banda en el que se está trabajando. Esto va a permitir la reducción de la tasa de error a la vez que aumenta la tasa de transmisión.

Esta tecnología surge entonces para ofrecer una mejora en la velocidad de transferencia y una mayor cobertura y estabilidad de la conexión. Por ello, resulta muy motivante el poder realizar un trabajo sobre una tecnología que podrá satisfacer tantas mejoras.

## 1.2. *Objetivos y enfoque*

El objetivo de este trabajo es realizar una antena formada por cuatro elementos basada en la tecnología MIMO. Deberá trabajar en tres distintas bandas y radiar a tres frecuencias específicas dentro de estas bandas, dichas frecuencias son 2.5 GHz, 3.5 GHz y 5.5 GHz. Estas bandas de trabajo se corresponden a la tecnología Wi-Fi, servicios móviles de banda ancha fija y para WiMAX.

El enfoque para abordar este objetivo empieza con el diseño de una antena formada por un elemento capaz de radiar a las frecuencias antes mencionadas, posteriormente se realiza el diseño de una agrupación de elementos con el objetivo de mejorar la transmisión y buscando que la interferencia entre ellos sea la menor posible.

Para conseguir el objetivo además de que el acoplamiento entre estos elementos sea el mejor, se diseñan también agrupaciones de elementos separados por barreras metálicas.

Por último, se fabrican las antenas resultantes para su posterior medida y comparación con los resultados teóricos diseñados con el software.

### **1.3. Organización de la memoria**

La primera parte de esta memoria comienza con los aspectos teóricos de las antenas, en el que se explica los fundamentos y aspectos más relevantes, seguimos con la explicación también teórica de las tecnologías utilizadas en este trabajo, como Wi-Fi, WiMAX, MIMO y tecnologías empleadas para las comunicaciones móviles.

Ahora nos embarcamos en el diseño de las diferentes antenas, siguiendo los objetivos marcados como el tamaño y características fundamentales que deben de tener. Para ello, haremos uso de programas como CST STUDIO, ADS Design Tool y MATLAB.

En los anexos de esta memoria se explicarán los diagramas de radiación de todas las antenas diseñadas, mediante figuras, tablas y un análisis para una mejor comprensión.

Después de todos los aspectos teóricos y de diseño pasamos a la fabricación de las antenas resultantes, para su posterior medida y comparación con los datos obtenidos por software.

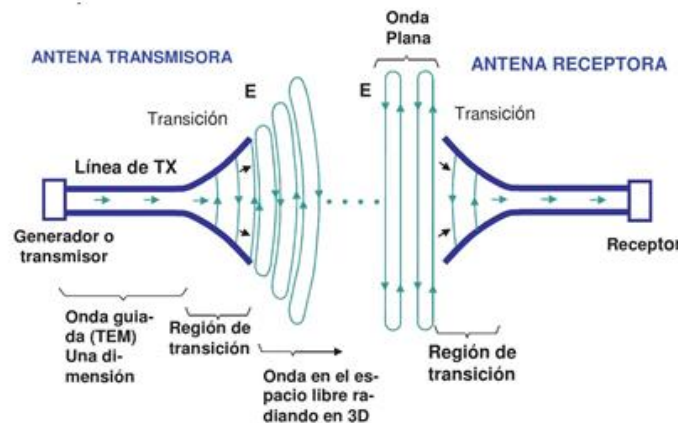
Por último, se comentarán las conclusiones de este trabajo, así como su relación para trabajos futuros, pues se está trabajando con una tecnología emergente que tendrá mucha utilidad y estará muy presente.

## 2. Conceptos teóricos

### 2.1. Antena

Se define antena a un dispositivo metálico que sea capaz tanto de recibir como de transmitir ondas electromagnéticas de radio, es decir, es una estructura de transición entre el que denominamos espacio libre y un dispositivo guiado. La línea de transmisión o el dispositivo guiado puede tomar la forma de una línea coaxial o de un conductor hueco como son las guías de onda, esto es usado para transportar la energía electromagnética desde la fuente de transmisión hacia la antena o, en el caso contrario, desde la antena hacia el receptor. [1]

La frecuencia ( $f$ ) y la longitud de onda de la señal ( $\lambda$ ) definen la característica de las ondas electromagnéticas mediante la siguiente relación:  $\lambda = \frac{c \text{ (velocidad de la luz)}}{f \text{ (frecuencia)}}$ . [2]



*Figura 1. Antena transmisora y receptora. Referencia [4].*

Las ondas viajeras desde la fuente hacia la antena junto con las ondas de la interfaz crean ondas estacionarias que son en realidad patrones de interferencia constructiva y destructiva. Estas ondas se producen dentro de la línea de transmisión que representan almacenamiento de energía y focos de concentración, muy típico de los aparatos resonantes. [1]

Si el conjunto que forma el sistema de la antena no está diseñado de manera correcta, puede ocasionar que la línea de transmisión actúe como elemento de almacenamiento de energía en vez de actuar como guía de onda y transporte de energía. Además, si la onda estacionaria produce intensidades de campo suficientemente grandes puede dar lugar a un arqueamiento dentro de las líneas de transmisión. [1]

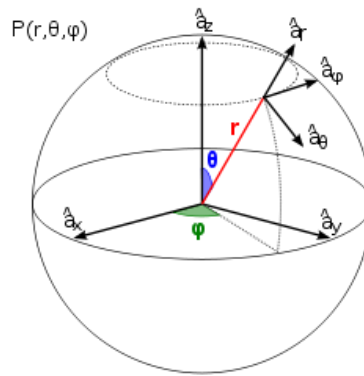
Una antena es una tecnología inalámbrica avanzada que requiere de un sistema para optimizar o acentuar la energía de radiación en algunas direcciones y eliminarla de otras. Por tanto, una antena tiene que dar servicio tanto como un dispositivo direccional como de un dispositivo de sondeo. [1]

## 2.2. Parámetros

### 2.2.1. Intensidad de radiación

En las características principales de una antena destaca su aptitud para concentrar su energía radiada en algunas direcciones del espacio, es decir, su aptitud para radiar con direccionalidad. Para medir esta característica se emplea el parámetro denominado intensidad de radiación. Antes se debe definir la zona en la que la antena está ubicada, para ello, se utilizan las coordenadas esféricas que nos permiten un fácil manejo en relación a la definición de una dirección en el espacio. [5]

Las ecuaciones de Maxwell se encargan de definir la intensidad de campo magnético  $\vec{H}$  [H/m] y la intensidad de campo eléctrico  $\vec{E}$  [V/m] que componen la onda que radia una antena. Se consigue entonces alcanzar la densidad de potencia radiada a partir de los campos magnéticos y de los campos eléctricos. [5]



*Figura 2. Coordenadas esféricas. Referencia [5].*

### 2.2.2. Impedancia de entrada

Se define como la impedancia que posee en los terminales una antena, la relación de la tensión entre la corriente de un par de terminales o la relación de los campos magnéticos y de los campos eléctricos en un punto. La relación de voltaje a la corriente en los terminales (sin carga) define la impedancia de entrada como: [1]

$$Z_c = R_c(w) + jX_c(w) \quad (1)$$

Se trata de un parámetro de gran importancia debido a que restringe el valor de la tensión que debe proporcionar el generador para así poder conseguir una corriente concreta en la antena y, como resultado, una potencia radiada específica. [2]

### 2.2.3. Diagramas de radiación

Se explican estos diagramas como una representación gráfica o función matemática, respecto de las coordenadas espaciales, de las propiedades de radiación de la antena. [1]

En general, en la zona de campo el patrón de radiación se decreta y se representa en referencia de las coordenadas direccionales. Las características de radiación contienen polarización, intensidad de campo, densidad de flujo de potencia, fase, intensidad de radiación o directividad. [1]

Lo normal es normalizar los patrones de potencia y de campo en referencia a su valor máximo, dando lugar a patrones normalizados de potencia y de campo. Además, el patrón de potencia se representa en decibelios (dB), debido a que una escala logarítmica puede recalcar más los detalles de los lóbulos secundarios que son los lóbulos con valores más bajos. [1]

Los parámetros más destacados en estos diagramas son: [2] [3]

- Lóbulo principal: La dirección donde se encuentra la máxima radiación.
- Lóbulos secundarios: son los laterales que contienen la mayor amplitud.
- Lóbulos laterales: lóbulo de radiación en cualquier dirección que no sea el principal. Contiguos al principal.
- Lóbulo posterior: La dirección opuesta a la dirección del lóbulo principal.
- El nivel de los lóbulos secundarios (SLL): se trata de la relación que tienen el mayor de los lóbulos secundarios y el lóbulo principal (dB).
- Ancho de haz principal a -3 dB: Toma un valor de potencia mitad el diagrama de radiación de potencia respecto al diagrama de potencia máximo
- Relación delante-atrás (FBR): relación existente entre el lóbulo posterior y el lóbulo principal en dB.

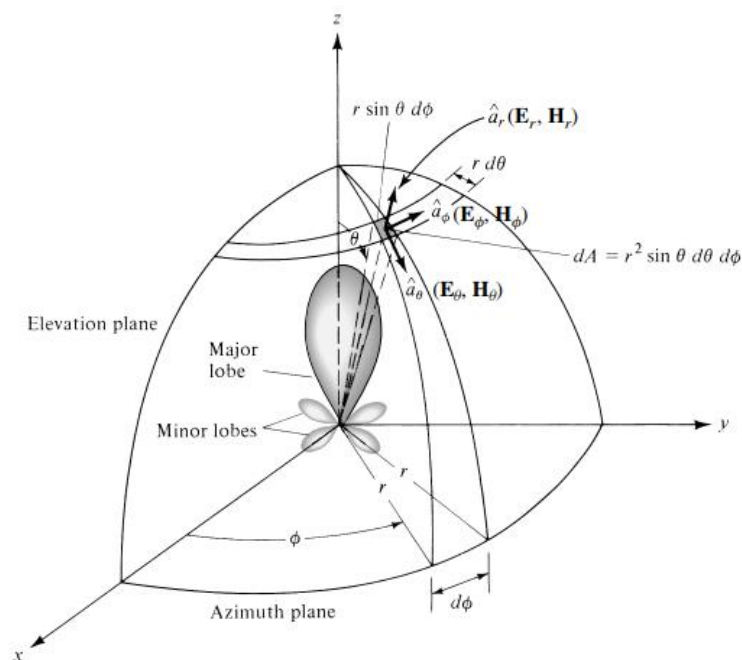


Figura 3. Ejemplo diagrama espacial de radiación. Referencia [1].

### 2.2.4. Directividad

Se define como el vínculo entre la intensidad de radiación media en cualquier dirección y la dirección que proporciona la antena de intensidad de radiación. [1] [5]

Tenemos entonces que la potencia total que radia la antena dividida por  $4\pi$  es equivalente a la intensidad de radiación media. La dirección de máxima intensidad de radiación estará implícita si no se especifica una dirección, es decir, la relación de su intensidad de radiación en una dirección específica sobre la fuente isotrópica es equivalente a la directividad de una fuente no isotrópica. De manera matemática tenemos: [1] [5]

$$D(\theta, \phi) \triangleq \frac{U(\theta, \phi)}{U_{isotropica}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{radiada}} = 4\pi r^2 \frac{\langle S(r, \theta, \phi) \rangle}{P_{radiada}} \quad (1)$$

$$P_{radiada} = \int_{4\pi} U(\theta, \phi) d\Omega = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} r^2 \langle S(r, \theta, \phi) \rangle \sin \theta d\theta d\phi \quad (1)$$



Figura 4. Diagramas de radiación. Referencia [4].

### 2.2.5. Ganancia

Se trata de una medida práctica para describir el rendimiento de una antena, está muy vinculada con la directividad en una antena, aunque esta medida considera la eficiencia que posee la antena además de sus capacidades direccionales. [1]

En una dirección específica, se puede definir la ganancia en una antena como el vínculo que se halla entre la radiación isotrópica de la potencia aceptada por una antena, que se consigue en la intensidad de radiación, y entre la intensidad que se obtiene en la dirección específica. [1]

Tenemos entonces que la potencia vista por la antena en la entrada dividida por  $4\pi$  es equivalente a la potencia isotrópicamente radiada correspondiente con la intensidad de radiación, se expresa entonces de la siguiente manera: [1]

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (1)$$



### 2.2.6. Polarización

Se define como la propiedad que posee una onda electromagnética para describir la dirección que cambia en el tiempo y la magnitud relativa del vector campo eléctrico. Es decir, la figura que traza la onda en función de la variación temporal por el extremo del vector será una ubicación fija en el espacio y el sentido en el que se traza será el observado durante la dirección de propagación. [1]

La polarización correspondiente a la energía radiada cambia en función de la dirección desde el centro de la antena, entonces pueden existir diferentes polarizaciones según el patrón. [1]


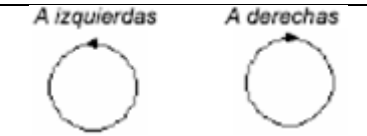
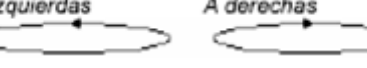
Polarización	Descripción	Ejemplos
Lineal	Segmento trazado por el cambio temporal de la onda.	
Circular	Círculo trazado por el cambio temporal de la onda.	
Elíptica	Otros casos.	

Tabla 1. Parámetros antenas, polarización.

### 2.2.7. Ancho de banda

Se explica como el conjunto de frecuencias dentro de las cuales el rendimiento que tiene la antena, respecto a algunos criterios, se adapta a un estándar en concreto. [3]

Tenemos entonces que el ancho de banda se corresponde con el conjunto de frecuencias, respecto de una frecuencia central, donde las propiedades de la antena se encuentran dentro de un valor determinado y aceptable en relación con dicha frecuencia central. [1]

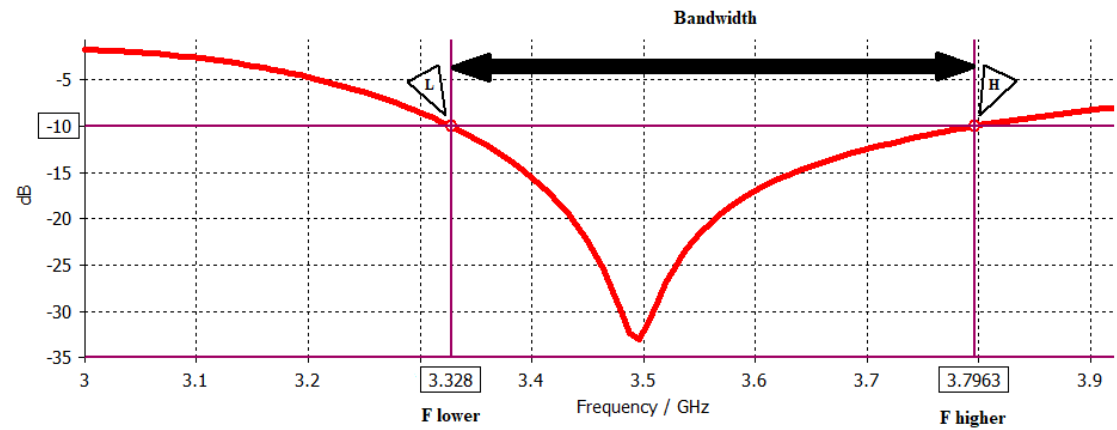


Figura 5. Parámetros antenas, ancho de banda. Referencia [propia].

### 2.2.8. Eficiencia

En los terminales de entrada y dentro de la configuración de la antena se producen unas pérdidas que se pueden cuantificar mediante la eficiencia total de la antena  $e_0$ . Estas pérdidas pueden estar originadas por:

- Reflexiones producidas por la adaptación que tienen lugar entre la antena y la línea de transmisión.
- Pérdidas en el dieléctrico o en la conducción.

$$e_0 = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} = \frac{G}{D} \quad (1)$$

### 2.2.9. Parámetros S

Es un vínculo entre las ondas entrantes (incidentes) y las ondas salientes (reflejadas), es decir, estos parámetros son los coeficientes de reflexión y los coeficientes de transmisión que se originan en dichas ondas. Bajo un determinado conjunto de frecuencias y en condiciones lineales, son los encargados de especificar la conducta de un dispositivo. [6]

Al introducir una red en una línea de transmisión produce una discontinuidad que afecta a las tensiones y corrientes que circulan por dicha línea de transmisión, esto se traduce como dispersión, referido a los parámetros S. [6]

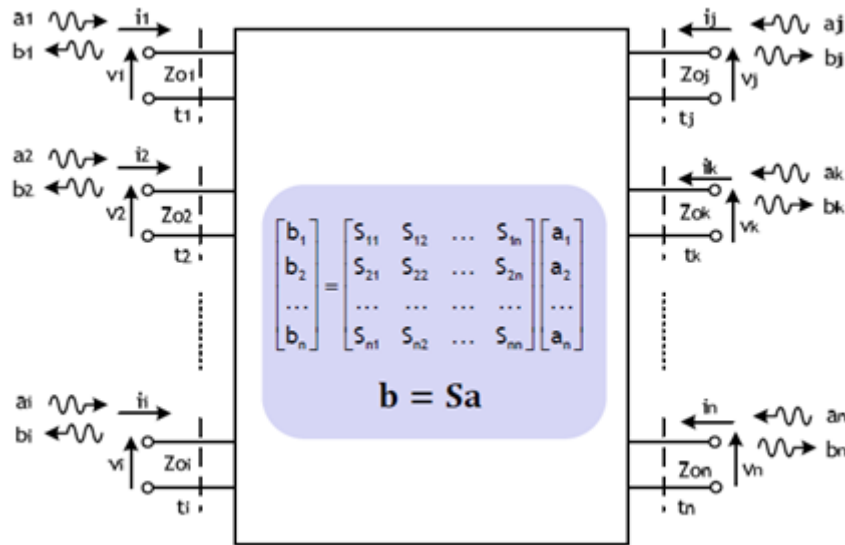


Figura 6. Red lineal de n puertos. Referencia [6].

La relación que describe la figura anterior entre las ondas incidentes y las ondas reflejadas es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix} \quad b = Sa \quad S_{ji} = \frac{b_j}{a_i} \Big|_{\substack{a_k=0 \\ k \neq 0}} \quad (6)$$

De las ecuaciones anteriores se obtiene que las ondas reflejadas (salientes) se denominan  $b_i$ , mientras que las ondas incidentes (entrantes) se denominan  $a_i$ . [6]

Para una mejor comprensión se muestra un ejemplo de una red lineal de dos puertos, con el nombre, definición y ecuación de los distintos parámetros de la red lineal.

Parámetro	Nombre	Definición	Ecuación
$S_{11}$	Coficiente de reflexión visto en el puerto 1.	Porción de potencia reflejada respecto con la porción de potencia que se aplica en la puerta 1.	$S_{11} = \left[ \frac{b_1}{a_1} \right]_{a_2=0}$
$S_{12}$	Coficiente de transmisión inversa.	Mide la potencia entrante en la puerta 1 respecto con la saliente por la puerta 2.	$S_{12} = \left[ \frac{b_1}{a_2} \right]_{a_1=0}$
$S_{21}$	Coficiente de transmisión directa.	Mide la potencia entrante en la puerta 2 respecto con la saliente por la puerta 1.	$S_{21} = \left[ \frac{b_2}{a_1} \right]_{a_2=0}$
$S_{22}$	Coficiente de reflexión visto en el puerto 2.	Porción de potencia reflejada respecto con la porción de potencia que se aplica en la puerta 2.	$S_{22} = \left[ \frac{b_2}{a_2} \right]_{a_1=0}$

Tabla 2. Parámetros  $S$  para red lineal de dos puertos.

### 2.3. Tecnología antenas MIMO

Se basa en salidas y entradas múltiples, es decir, múltiples antenas que transmiten en un determinado ambiente de propagación a un receptor que posee múltiples antenas. En este tipo de sistemas, el transmisor utiliza una formación de haces, es decir, una técnica capaz de procesar las señales direccionales con la función de mejorar la calidad existente en la conexión. [9]

La señal que se recibe está formada por el conjunto de señales transmitidas por las antenas emisoras, obteniendo una señal más robusta en el receptor. Otra manera de mejorar aún más la robustez de la señal en el enlace es añadiendo antenas en el receptor con combinación de diversidad, esto es, una única entrada para múltiples salidas. [9]

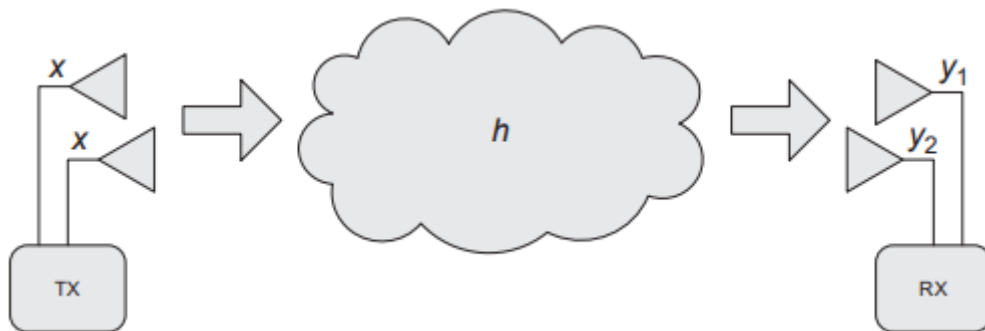


Figura 7. Tecnología MIMO, emisión y recepción. Referencia [9].

## 2.4. Tecnología microstrip

Una antena microstrip consiste en un parche metálico impreso en un sustrato dieléctrico fino que va conectado a tierra. Originalmente, la antena era alimentada a través de una línea coaxial en el interior del sustrato o por una línea microstrip coplanar. Este último tipo de alimentación permite alimentar los elementos de la antena impresos en el sustrato como son las redes y los distintos circuitos impresos. La antena microstrip radia un haz considerablemente amplio al plano del sustrato, por tanto, el perfil que tiene es muy bajo además de poder fabricarse utilizando técnicas de circuitos fotolitográficos, esto implica que las antenas tendrán un coste potencialmente bajo. [7]

Otras de las ventajas que tienen son la fácil fabricación en matrices planas o lineales y la fácil integración con circuitos integrados de microondas. [7]

Las desventajas de las configuraciones originales incluyen un ancho de banda estrecho, una radiación espuria en la alimentación, pureza pobre en la polarización, una limitación en la potencia además de problemas de tolerancia. [7]

Las antenas microstrip se utilizan para conexiones inalámbricas de microondas de banda estrecha que requieren una cobertura semiesférica, es decir, son antenas impresas resonantes prolongación de la línea de transmisión microstrip. [7]

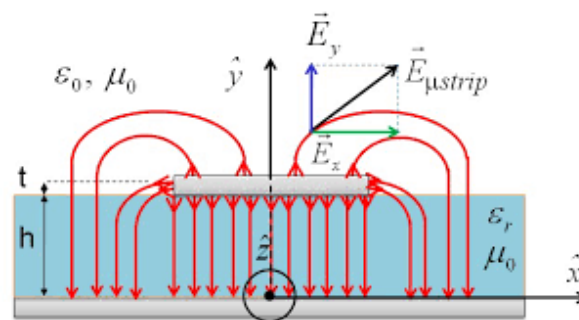


Figura 8. Estructura microstrip. Referencia [8].

El parche según su tamaño y forma puede transformar la potencia en radiación mediante la siguiente estructura: [8]

- El tamaño del parche tiene que estar relacionado con la longitud de onda.
- El parche tiene que ser metálico.
- El sustrato utilizado tiene que ser dieléctrico.
- En un lado del sustrato está el parche y, en el lado opuesto, un plano de masa.

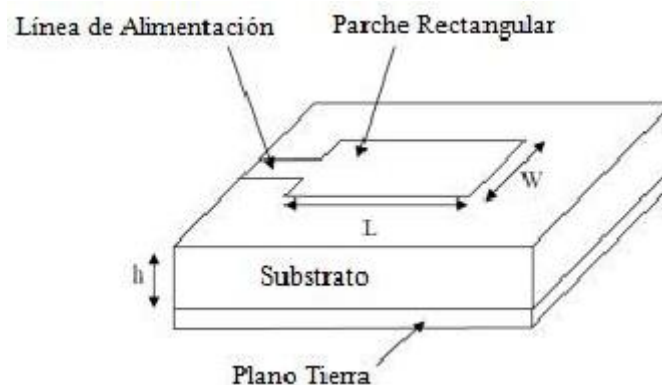
### 2.4.1. Técnica de alimentación microstrip

Un de los aspectos críticos en el diseño de la antena es la red de alimentación, pues se necesita que sea eficiente para conseguir estar a la altura del diseño de los elementos radiantes que componen la antena. Mediante el acoplamiento correcto de las impedancias, dentro de una zona de trabajo específica, se conseguirá que el parche radie de manera eficiente. Para ello, existen distintos métodos de alimentación: [8]

- **Alimentación directa.** Consiste en una relación directa entre el elemento radiante de la antena y la red de alimentación. Caben destacar dos formas de alimentación directa como son la alimentación mediante cable coaxial y la alimentación por línea microstrip. [8]

En la alimentación por línea microstrip existen dos principales maneras de realizar la conexión entre el parche y la red de alimentación, en la primera, la conexión se realiza directamente con la línea microstrip en un borde del parche, y en la otra manera, se realiza una inserción directamente al parche. En esta forma de alimentación, para conseguir una óptima adaptación se debe hacer un diseño de la impedancia característica más adecuado. [8]

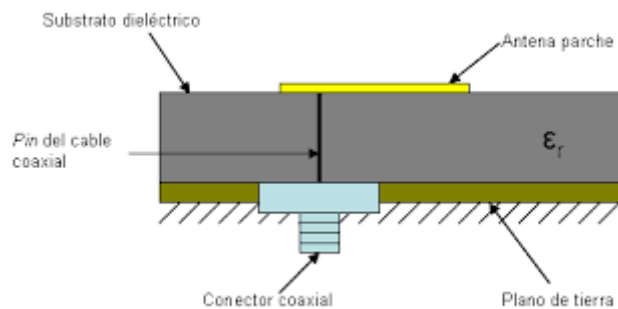
Una de las ventajas de esta forma de alimentación es la facilidad para realizar el diseño, por contraste, las desventajas que presenta son la baja eficiencia tanto en el acoplamiento como en el ancho de banda. [8]



*Figura 9. Alimentación por línea microstrip. Referencia [8].*

En la alimentación por sonda coaxial el hilo central del cable coaxial se conecta directamente al parche, y al plano de masa se conecta el conductor exterior. Se utiliza generalmente para frecuencias bajas (hasta 3 GHz), además hay que contemplar que la posición del parche respecto a la sonda marcará la cifra de la impedancia. [8]

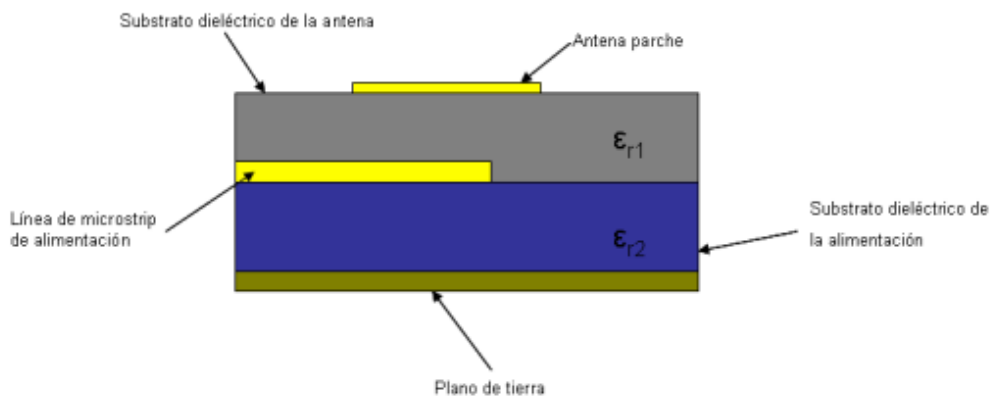
Una de las ventajas de esta forma de alimentación es que disminuye los niveles de radiación espuria, en contraste, algunas desventajas que presenta son los problemas en la fabricación si el sustrato que se tiene es demasiado fino y que nos proporciona un ancho de banda más limitado. [8]



*Figura 10. Alimentación por sonda coaxial. Referencia [8].*

- **Alimentación por proximidad** En este tipo de red de alimentación el acoplamiento se produce de manera electromagnética, es decir, no existe contacto directo con el parche como ocurría en la red de alimentación antes explicada. El substrato para esta red de alimentación tendrá dos capas distintas, la capa superior tendrá el parche grabado y la capa inferior tendrá la línea de alimentación, esta última capa se compone de dos partes, en la parte superior tiene la parte conductora y en la parte inferior tiene el plano de masa. [8]

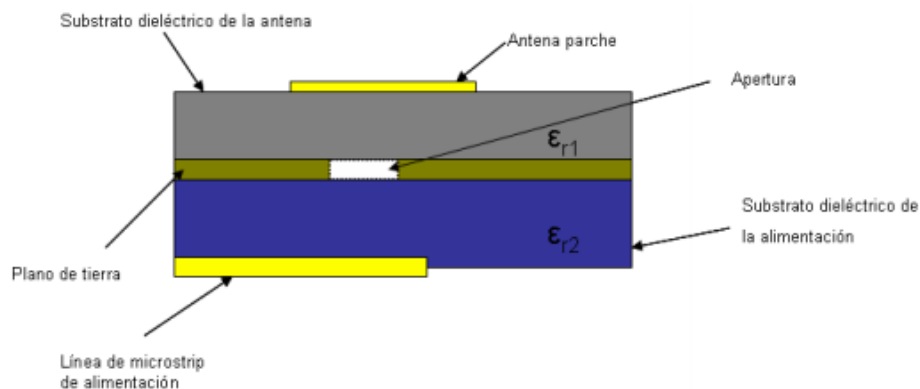
La principal ventaja de este tipo de alimentación es poder mejorar las capas que componen el substrato por separado, esto se consigue manejando permitividades distintas en ambos substratos. [8]



*Figura 11. Alimentación por proximidad. Referencia [8].*

- **Alimentación por ranura.** La estructura de este tipo de alimentación es muy similar al explicado en alimentación por proximidad, está formada por dos substratos dieléctricos separados por un plano de masa que tiene una ranura. En el substrato superior se encuentra el elemento radiante y en el substrato inferior se encuentra la red de alimentación. [8]

La principal ventaja que tiene es evitar que surjan fenómenos no deseados, esto es posible porque la línea de alimentación se encuentra separada de la antena por el plano de masa (está en la capa inferior) lo que produce que la radiación hacia a la antena sea mínima. [8]



*Figura 12. Alimentación por ranura. Referencia [8].*

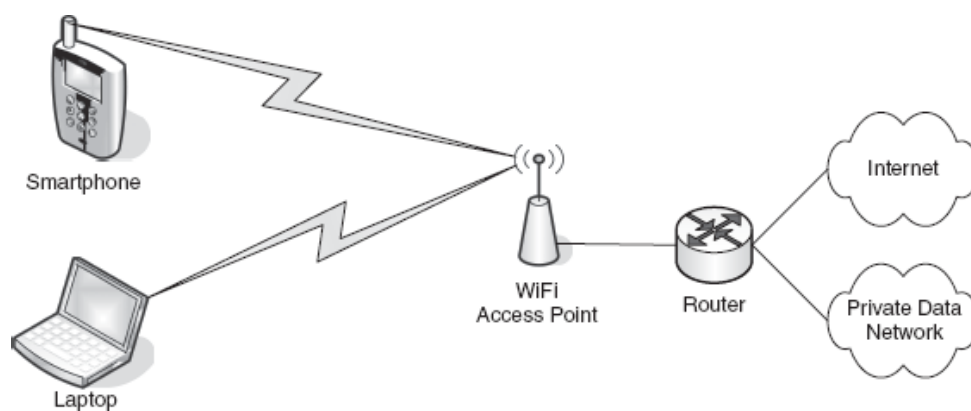
## 2.5. Tecnología Wi-Fi

El conjunto de dispositivos no cableados móviles se actualiza e implementa medios inalámbricos con la función de reducir el mayor costo posible además de brindar servicios de paquetes más eficientes. Wi-Fi desempeña una función importante en cuanto a la experiencia que tienen los usuarios finales en la banda ancha. [10]

Wi-Fi ha cosechado un gran éxito comercial para los datos móviles, siendo el acceso principal común que los operadores móviles utilizan para poder mejorar sus servicios. La RAN, red de acceso por radio, toma un papel secundario en cuanto al suministro de datos móviles. [10]

Es un sistema de acceso sin cables que conecta dispositivos a Internet o una LAN mediante una conexión inalámbrica. Wi-Fi es una LAN sin cables que se fundamenta en los estándares 802.11. Una de sus ventajas es la descongestión del espectro con licencia mediante una técnica estable de descarga para los servicios de datos. [10]

Por medio de un punto de acceso Wi-Fi consigue el acceso por radio para que los dispositivos inalámbricos se conecten a una WAN / LAN. Se conoce también como WLAN, es decir, red de área local sin cables, pudiendo trabajar como una red aislada también puede actuar como punto de acceso para obtener el tráfico de datos inalámbricos o formar parte de una LAN corporativa. Según las condiciones y los servicios, una red local inalámbrica puede exigir diferentes niveles de acreditación, o puede no requerir nada. [10]



*Figura 13. Componentes de una red Wi-Fi. Referencia [10].*

## 2.6. Tecnología WiMAX

Es la interoperabilidad mundial para el acceso por microondas que proporciona un acceso de banda ancha de manera inalámbrica. Se basa en el protocolo de especificación de interfaz del servicio de datos por cable y utiliza de esquema de modulación el acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA). Se trata de un estándar del IEEE basado en el grupo de estándares IEEE 802.16 para un método basado en paquetes IP que se puede diseñar bajo una configuración de duplexación por división de frecuencia (FDD) o bajo una configuración de duplexación por división de tiempo (TDD). Es un servicio complementario a Wi-Fi de banda ancha. Mobile WiMAX se clasifica como una tecnología 3G y 4G, es decir, acceso por radio sin cables. [10]

## 3. Criterios de diseño

### 3.1. Introducción

Se van a especificar las normas diseño, fabricación y medición de las antenas que por medio del programa CST se van a implementar. Los principales criterios para el diseño de las antenas van a ser el tamaño máximo que podrán tener las distintas antenas, en función de si están compuestas por uno, dos o cuatro elementos, la banda de trabajo, pues hay que tener muy presente que nuestras antenas harán uso de las tecnologías Wi-Fi y WiMAX y, por último, el valor en el que deben oscilar los coeficientes de reflexión y los coeficientes de acoplamiento.

### 3.2. Tamaño de las antenas y el substrato

- Para el substrato de todas las antenas se ha utilizado un material dieléctrico de espesor  $H = 1.58$  mm, con tangente de pérdidas  $\tan \delta = 0.025$ , con permitividad dieléctrica  $\epsilon_r = 4.3$  y permeabilidad magnética  $\mu_r = 1$ , denominado FR-4 (lossy).
- Espesor del cobre es de  $PEC = 0.035$  mm.
- Las dimensiones para las antenas varían según esté formada por uno, dos o cuatro elementos, estas serán las dimensiones máximas de las antenas.
  - Antena formada por un elemento: 35 x 35 mm.
  - Antena MIMO formada por dos elementos: 35 x 75 mm.
  - Antena MIMO formada por cuatro elementos: 75 x 150 mm.

### 3.3. Bandas de trabajo, acoplamiento y reflexión de la antena

Puesto que las bandas de interés se encuentran entre 1 GHz y 8GHz, definiremos estas frecuencias como la mínima y máxima de trabajo. Para todos los diseños vamos a trabajar con tres bandas claramente diferenciadas, el valor de estas bandas no debe tener un ancho de banda fijo, por lo tanto, puede oscilar de manera muy aproximada los siguientes valores.

- Banda 1: 2.3 GHz a 2.7 GHz.
- Banda 2: 3.3 GHz a 3.7 GHz.
- Banda 3: 5.3 GHz a 5.7 GHz.

Para la adaptación tenemos que saber que se produce cuando la reflexión está por debajo o igual a -10 dB y para el acoplamiento debemos tener en cuenta que tendremos un mejor aislamiento de nuestra antena cuanto menor sean los coeficientes de acoplamiento entre los distintos elementos que la forman. Por tanto, los coeficientes de acoplamiento deberán ser menores o iguales a -20 dB.



Debido a la simetría en el diseño de las antenas debemos saber que para la antena MIMO formada por dos elementos  $S_{11} = S_{22}$  y  $S_{12} = S_{21}$ . Y para la antena MIMO formada por cuatro elementos  $S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44}$ ,  $S_{12} = S_{21} = S_{43} = S_{34}$  y  $S_{31} = S_{13} = S_{42} = S_{24}$ .

- Antena formada por un elemento.
  - $S_{11} \leq -10$  dB para las bandas 1, 2 y 3.
  - $S_{11} \geq -10$  dB para el resto de las frecuencias.
- Antena formada por dos elementos.
  - $S_{11} \leq -10$  dB para las bandas 1, 2 y 3.
  - $S_{11} \geq -10$  dB para el resto de las frecuencias.
  - $S_{12} \leq -20$  dB para las bandas 1, 2 y 3.
- Antena formada por cuatro elementos.
  - $S_{11} \leq -10$  dB para las bandas 1, 2 y 3.
  - $S_{11} \geq -10$  dB para el resto de las frecuencias.
  - $S_{12} \leq -20$  dB para las bandas 1, 2 y 3.
  - $S_{13} \leq -20$  dB para las bandas 1, 2 y 3.
  - $S_{14} \leq -20$  dB para las bandas 1, 2 y 3.

## 4. Diseño de la antena

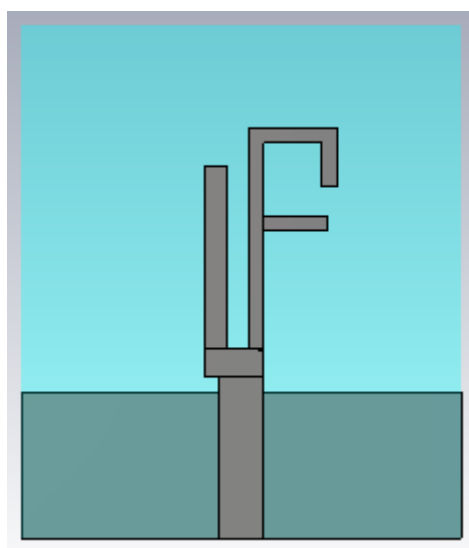
### 4.1. Introducción

Para llevar a cabo este trabajo fin de grado, el diseño y la simulación de los resultados se han realizado con el programa CST studio, con el fin de conseguir una antena MIMO formada por varios elementos. Se irá realizando el diseño con uno, dos y cuatro elementos simétricos, que finalmente irán impresos en una placa. De esta forma vamos a obtener unos anchos de banda mayores además de poder reducir los costes en la producción de las antenas.

Vamos entonces a proceder con el estudio, diseño y simulación de los distintos elementos que darán como resultado la antena MIMO final formada por cuatro antenas simétricas.

### 4.2. Antena formada por un elemento

Empezamos el diseño de la primera antena formada por un elemento que a su vez se forma por tres elementos que radian a tres frecuencias distintas conectados todos ellos a una misma fuente de alimentación. La estructura en forma de “F” se compone de dos de los elementos de la antena, el que se encuentra más arriba respecto a la fuente de alimentación corresponde con el elemento que radia a una frecuencia de 2.5 GHz y el elemento que se encuentra bajo al anterior mencionado, corresponde al que radia a una frecuencia de 5.5 GHz. Para la frecuencia de 3.5 GHz diseñamos el elemento que se encuentra a la izquierda de los elementos en forma de “F”.

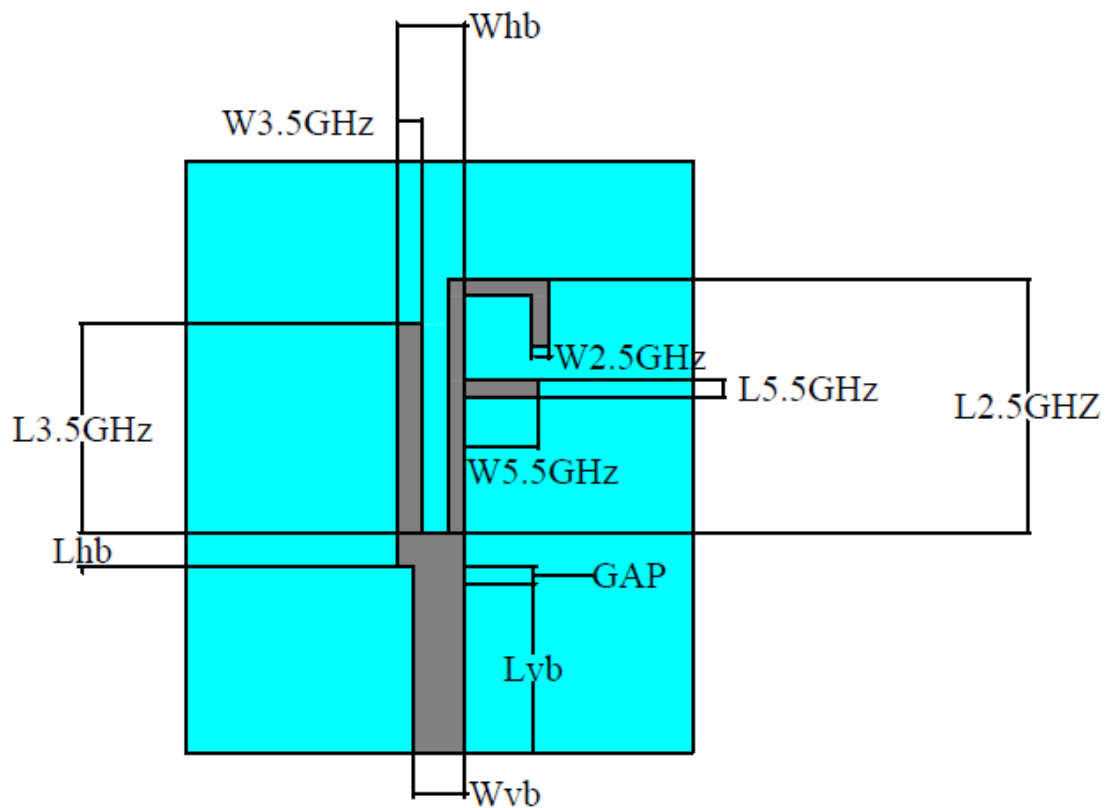


*Figura 14. Antena de un elemento.*

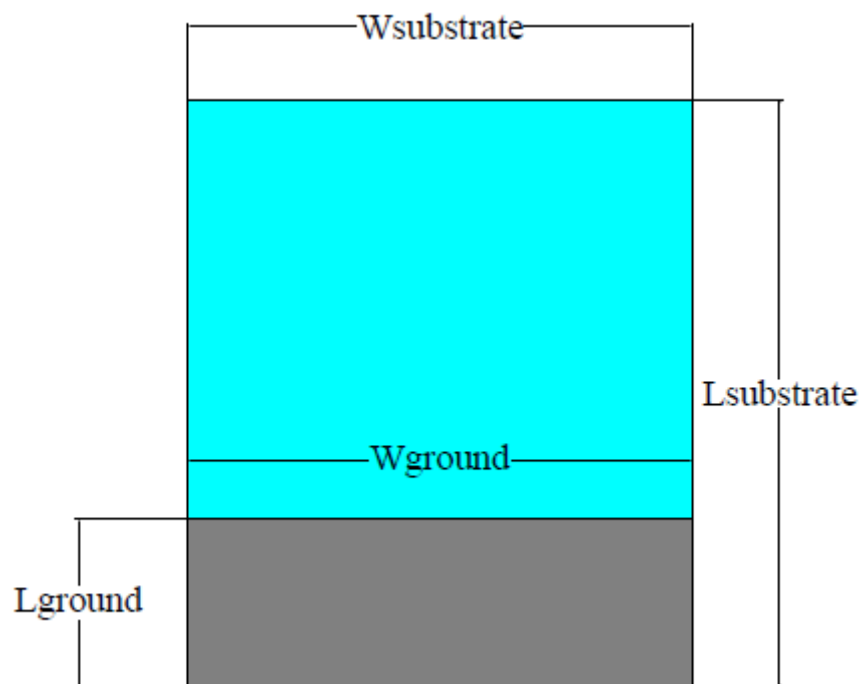
Partimos de las fórmulas teóricas para obtener de manera aproximada las medidas de los distintos componentes de la antena. Posteriormente modificamos los parámetros que la componen para así poder conseguir los resultados que buscamos.

Vamos a definir ahora la anchura de la alimentación, para ello, debemos saber que estamos trabajando con una impedancia de  $50\ \Omega$  que es la utilizada principalmente para comunicaciones inalámbricas. Esto se debe a que se trata de un compromiso entre la capacidad de manejo de la potencia y la pérdida única por unidad de longitud.

En el diseño de la antena vamos a utilizar una variable a la que llamamos base vertical, tras realizar los cálculos obtenemos que la anchura de esta variable es aproximadamente de 3 mm. Realizamos varias simulaciones, en cada una de ellas modificamos el ancho de esta variable para ver el comportamiento de la antena. Colocamos un puerto en la base de la antena, lo que nos va a permitir simular el conector de  $50\ \Omega$ . Todos los resultados están normalizados a este valor.



*Figura 15. Antena de un elemento acotada, "vista frontal".*



*Figura 16. Antena de un elemento acotada, “vista posterior”.*

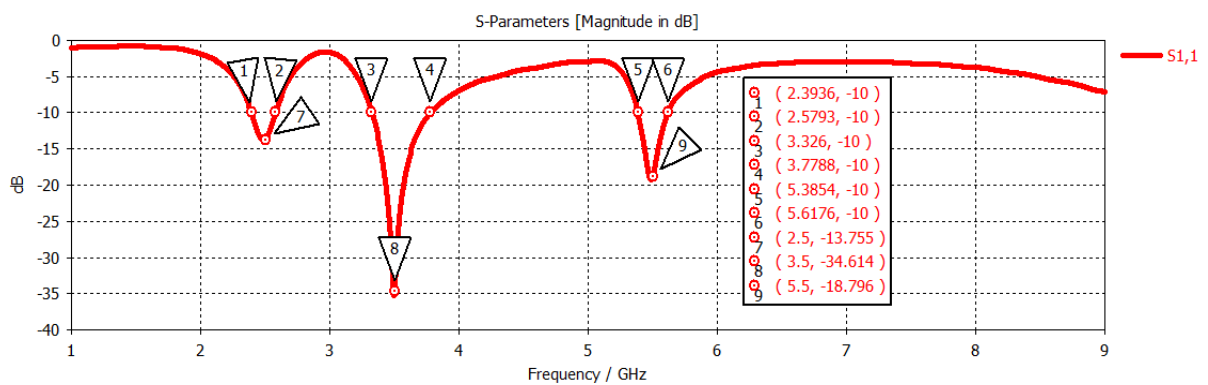


*Figura 17. Antena de un elemento acotada, “vista lateral”.*

Variable	Medida (mm)
PEC	0.035 mm
$W_{\text{ground}}$	30.00 mm
$L_{\text{ground}}$	10.00 mm
$W_{\text{substrate}}$	30.00 mm
$L_{\text{substrate}}$	35.00 mm
$H_{\text{substrate}}$	1.58 mm
$W_{5.5 \text{ GHz}}$	4.35 mm
$L_{5.5 \text{ GHz}}$	1.00 mm
$W_{3.5 \text{ GHz}}$	1.50 mm
$L_{3.5 \text{ GHz}}$	12.35 mm

$W_{2.5 \text{ GHz}}$	1.00 mm
$L_{2.5 \text{ GHz}}$	15.00 mm
GAP	1.00 mm
$W_{vb}$	3.00 mm
$L_{vb}$	10.00 mm
$W_{hb}$	4.00 mm
$L_{hb}$	2.00 mm

**Tabla 3. Dimensiones de las variables de la antena de un elemento.**



**Figura 18.  $S(1,1)$  coeficiente de reflexión.**

Se pueden observar las tres distintas bandas que se estaban buscando. El coeficiente de reflexión está por debajo de -10 dB en todas ellas, por tanto, se cumple con las especificaciones anteriormente explicadas.

### 4.3. Antena formada por dos elementos

Partiendo como base del diseño anterior vamos a generar una antena formada por una duplicación de la antena de un elemento con la diferencia que el plano de masa de ambas antenas va a estar separado una distancia  $d(\text{mm})$ .

Vamos a hacer el análisis de la antena primero sin barreras metálicas y posteriormente con barreras metálicas que nos va a permitir cumplir con los requisitos de diseño.

4.3.1. Antena formada por dos elementos sin barreras



Figura 19. Antena de dos elementos sin barreras.

Vamos ahora a acotar la imagen para poder observar de mejor manera las medidas de esta nueva antena, además de poner sus valores más significativos en una tabla para una mejor comprensión.

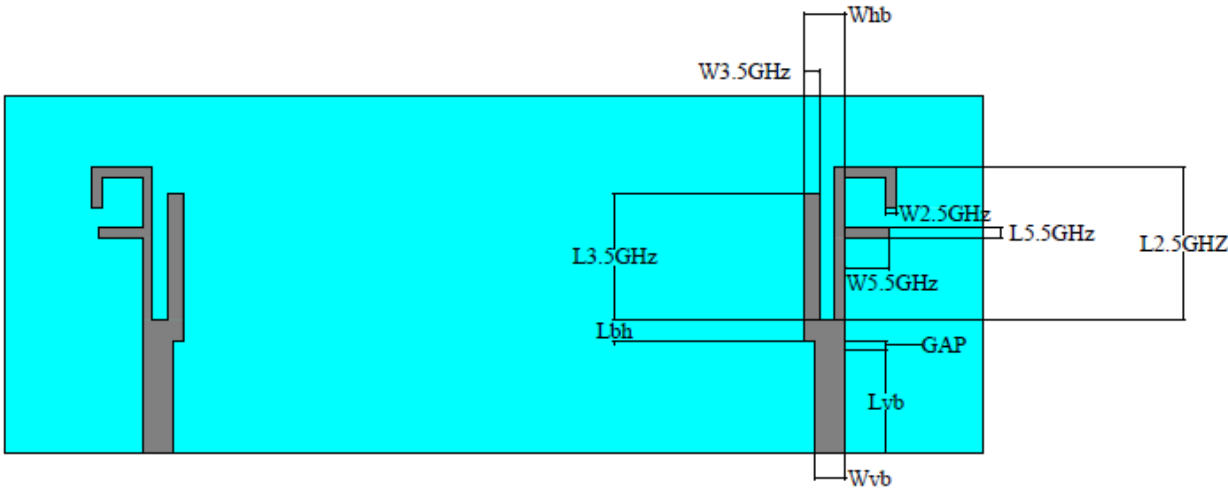


Figura 20. Antena de dos elementos sin barreras acotada, “vista frontal”.

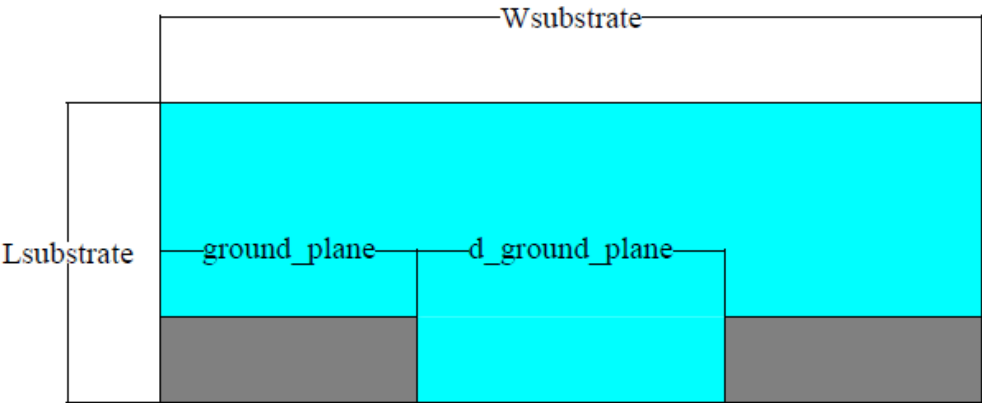


Figura 21. Antena de dos elementos sin barreras acotada, “vista posterior”.

Variable	Medida (mm)
PEC	0.035 mm
$W_{\text{ground\_plane}}$	30.00 mm
$L_{\text{ground}}$	10.00 mm
$W_{\text{substrate}}$	96.00 mm
$L_{\text{substrate}}$	35.00 mm
$H_{\text{substrate}}$	1.58 mm
$d_{\text{ground\_plane}}$	18 mm
$W_{5.5 \text{ GHz}}$	4.20 mm
$L_{5.5 \text{ GHz}}$	1.00 mm
$W_{3.5 \text{ GHz}}$	1.50 mm
$L_{3.5 \text{ GHz}}$	12.10 mm
$W_{2.5 \text{ GHz}}$	1.00 mm
$L_{2.5 \text{ GHz}}$	13.70 mm
GAP	1.00 mm
$W_{\text{vb}}$	3.20 mm
$L_{\text{vb}}$	10.00 mm
$W_{\text{hb}}$	4.00 mm
$L_{\text{hb}}$	2.00 mm

Tabla 4. Dimensiones de las variables de la antena de dos elementos sin barreras.

Normalizamos los puertos a  $50 \Omega$  y simulamos para obtener los siguientes parámetros S en los que podremos observar los coeficientes de reflexión y de acoplamiento.

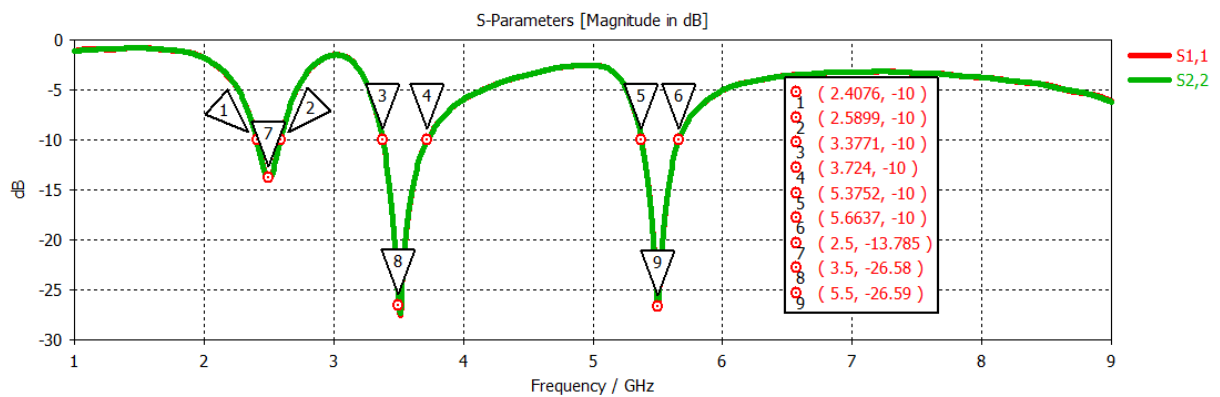


Figura 22.  $S(1,1)$  y  $S(2,2)$  coeficientes de reflexión.

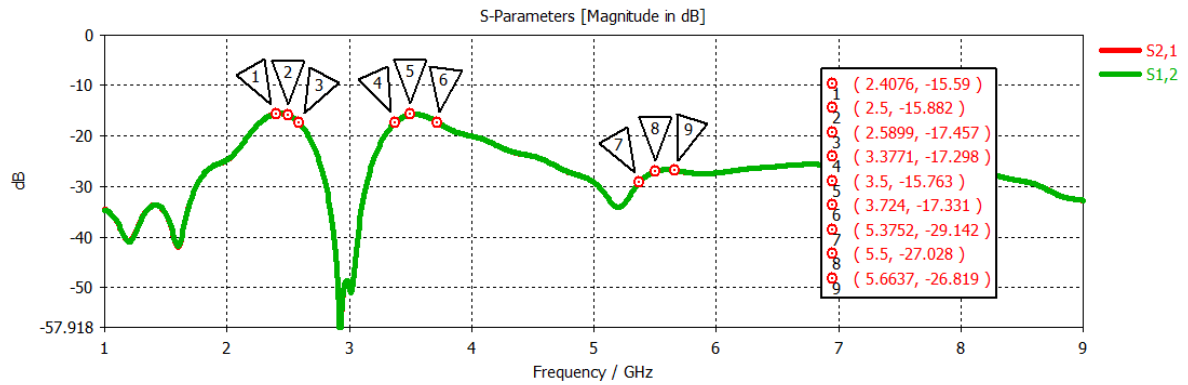


Figura 23.  $S(2,1)$  y  $S(1,2)$  coeficientes de acoplamiento.

Analizamos los resultados y observamos que cumplimos los criterios de diseño para los coeficientes de reflexión pues estamos en las bandas de trabajo por debajo de -10 dB, pero no se cumplen para los coeficientes de acoplamiento debido a que las bandas de 2.5 GHz y 3.5 GHz no se encuentra por debajo de -20 dB. Además, necesitamos que la antena sea más pequeña, por tanto, vamos a realizar este diseño con barreras metálicas.

#### 4.3.2. Antena formada por dos elementos con barreras

Ahora vamos a realizar el mismo diseño explicado en el apartado 4.3.1. con la diferencia que vamos a incluir barreras metálicas, esto nos va a permitir reducir el tamaño de la antena. En el caso anterior entre mayor distancia tuviesen los elementos mejor serían los coeficientes de acoplamiento, pero necesitamos también cumplir los requisitos de dimensiones, por tanto, vamos a realizar este diseño de barreras metálicas con el objetivo de mejorar estos coeficientes y a su vez reducir el tamaño final de la antena.

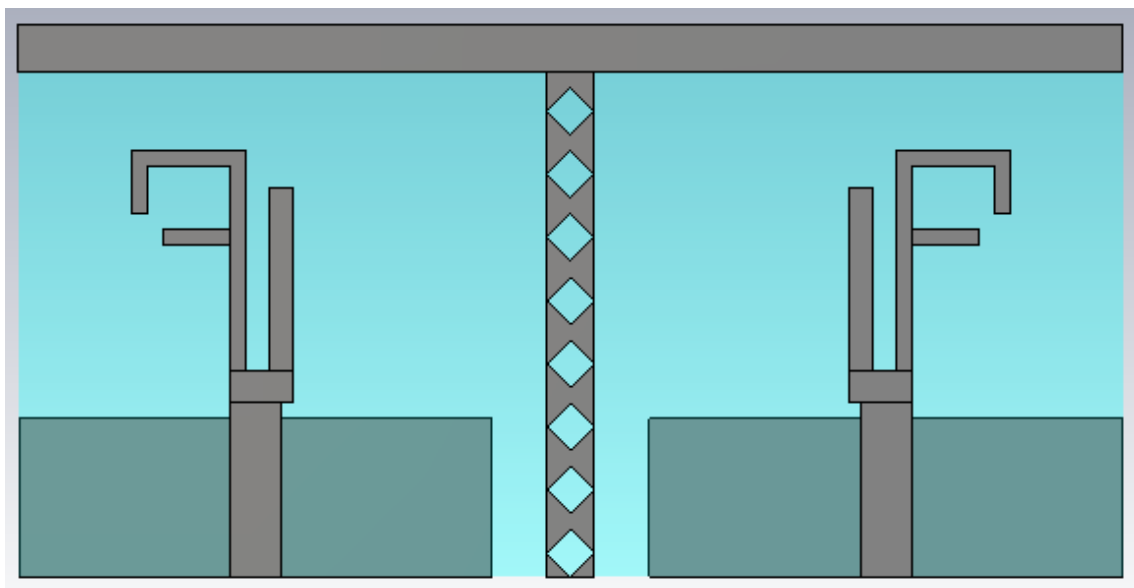
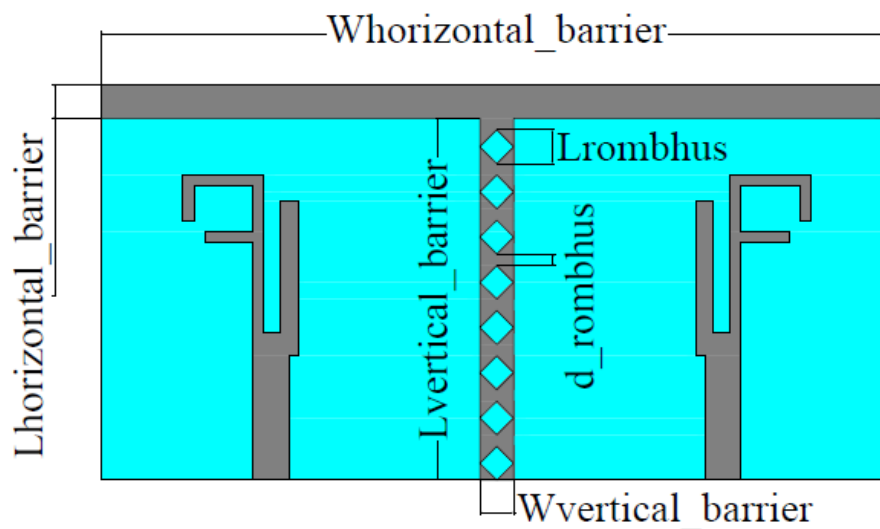


Figura 24. Antena de dos elementos con barreras metálicas.

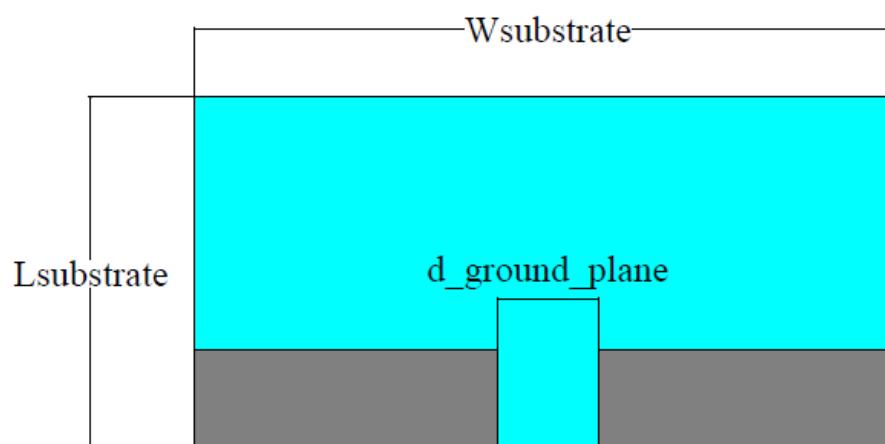


Vamos ahora a acotar las imágenes para poder observar de mejor manera las medidas de esta nueva antena, además de poner sus valores más significativos en una tabla para una mejor comprensión.

Hay dos barreras, la horizontal es de igual anchura al sustrato y la barrera vertical tiene unos agujeros en forma de rombos separados 1 mm entre ellos con una anchura y longitud de 3 mm cada uno. Esto nos permite tener un buen coeficiente de adaptación además de conseguir radiar a las tres frecuencias deseadas.



*Figura 25. Antena de dos elementos con barreras metálicas acotada “vista frontal”.*



*Figura 26. Antena de dos elementos con barreras metálicas acotada “vista posterior”.*

Variable	Medida (mm)
$W_{\text{substrate}}$	70 mm
$L_{\text{substrate}}$	35 mm
$d_{\text{ground\_plane}}$	10 mm
$W_{\text{horizontal\_barrier}}$	70 mm
$L_{\text{horizontal\_barrier}}$	3 mm
$W_{\text{vertical\_barrier}}$	3 mm
$L_{\text{vertical\_barrier}}$	32 mm
$d_{\text{rombhus}}$	1 mm
$L_{\text{rombhus}}$	3 mm

Tabla 5. Dimensiones de las variables de la antena de dos elementos con barreras.

Normalizamos los puertos a  $50 \Omega$  y simulamos para obtener los siguientes parámetros S en los que podremos observar los coeficientes de reflexión y de acoplamiento.

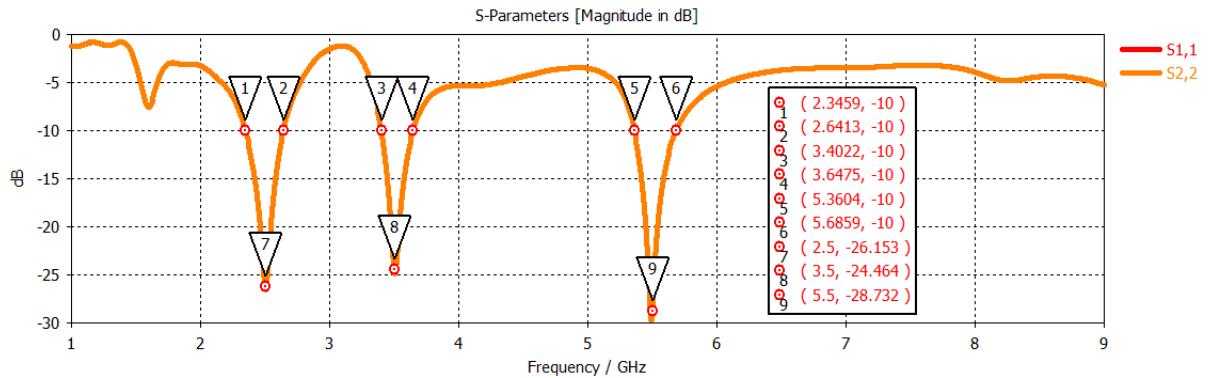


Figura 27.  $S(1,1)$  y  $S(2,2)$  coeficientes de reflexión.

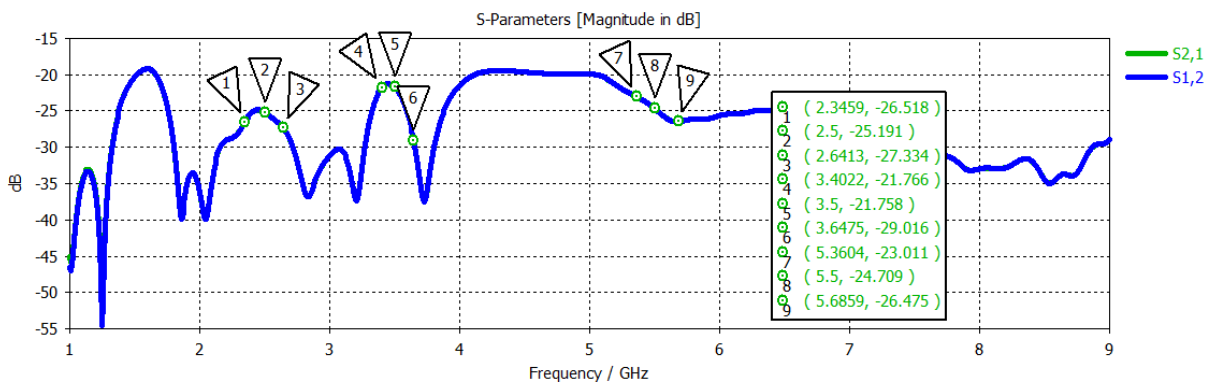


Figura 28.  $S(2,1)$  y  $S(1,2)$  coeficientes de acoplamiento.

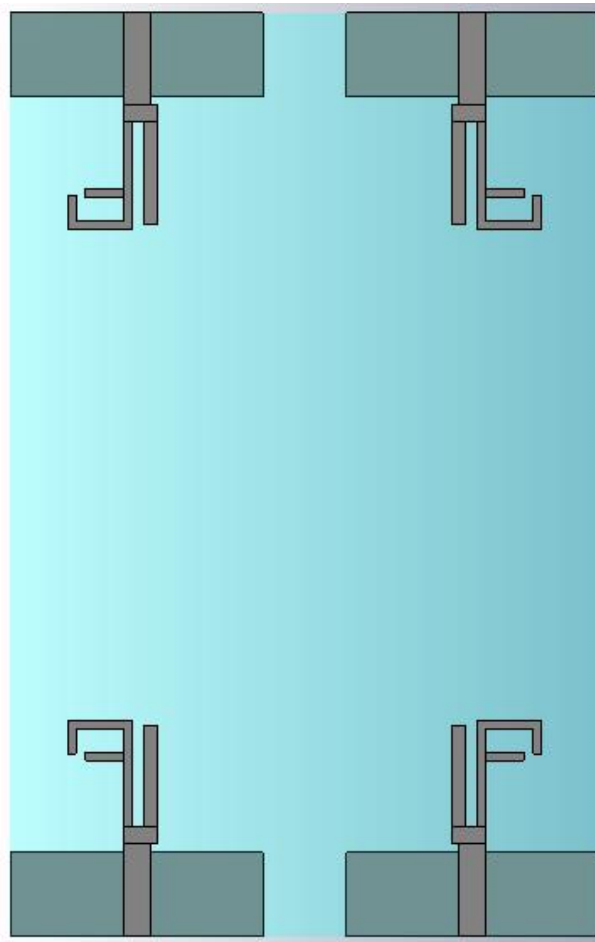
Analizamos estos resultados y podemos observar que para los coeficientes de reflexión  $S(1,1)$  y  $S(2,2)$  se encuentran por debajo de -10 dB en todas las bandas de trabajo. Ahora analizamos los coeficientes de acoplamiento  $S(2,1)$  y  $S(1,2)$  y observamos que para las bandas deseadas se encuentran por debajo de -20 dB obteniendo así, gracias a las barreras metálicas, unos buenos resultados de reflexión y de acoplamiento además de haber podido reducir el tamaño de la antenna.

#### **4.4. Antena formada por cuatro elementos**

Partiendo como base del diseño anterior vamos a generar una antena formada por una duplicación de la antena formada por dos elementos con la diferencia que el plano de masa de las antenas que forman la MIMO va a estar separado una distancia  $d(\text{mm})$ , tanto horizontal como verticalmente.

Vamos a hacer el análisis de la antena primero sin barreras metálicas y posteriormente con barreras metálicas que nos va a permitir cumplir con los requisitos de diseño.

##### **4.4.1. Antena formada por cuatro elementos sin barreras**



*Figura 29. Antena de cuatro elementos sin barreras metálicas.*

Vamos ahora a acotar la imagen para poder observar de mejor manera las medidas de esta nueva antena, además de poner sus valores más significativos en una tabla para una mejor comprensión.

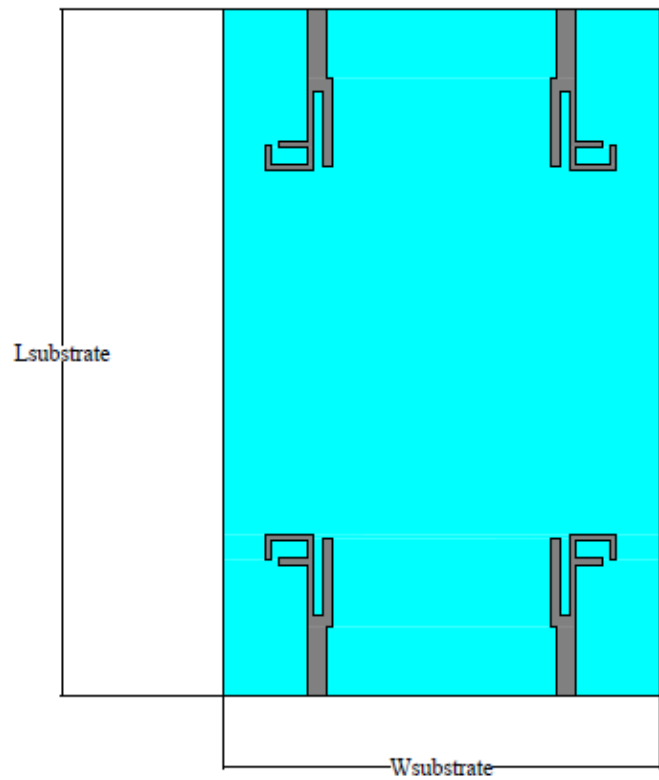


Figura 30. Antena de cuatro elementos sin barreras metálicas acotada “frontal”.

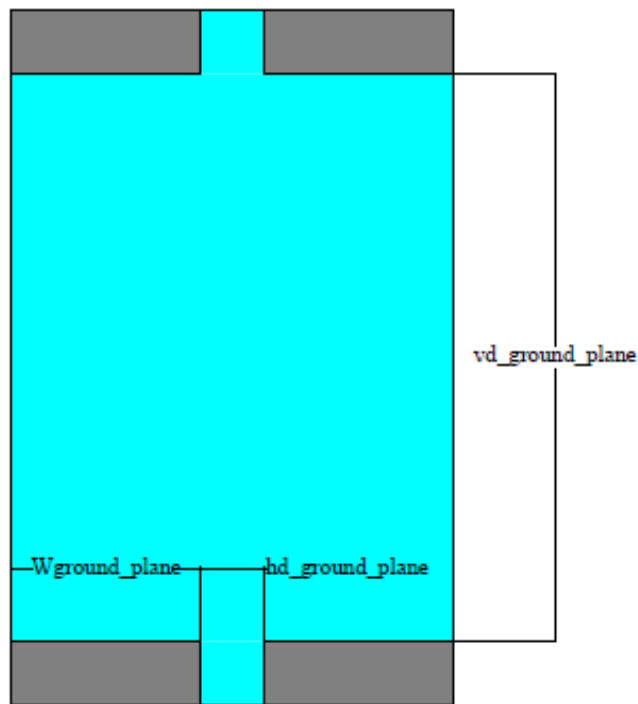


Figura 31. Antena de cuatro elementos sin barreras metálicas acotada “vista posterior”.

Variable	Medida (mm)
PEC	0.035 mm
$W_{\text{ground\_plane}}$	30.00 mm
$L_{\text{ground}}$	10.00 mm
$W_{\text{substrate}}$	70.00 mm
$L_{\text{substrate}}$	110.00 mm
$H_{\text{substrate}}$	1.58 mm
hd_ground_plane	10 mm
vd_ground_plane	90 mm

Tabla 6. Dimensiones de las variables de la antena de cuatro elementos sin barreras.

Normalizamos los puertos a  $50 \Omega$  y simulamos para obtener los siguientes parámetros S en los que podremos observar los coeficientes de reflexión y de acoplamiento.

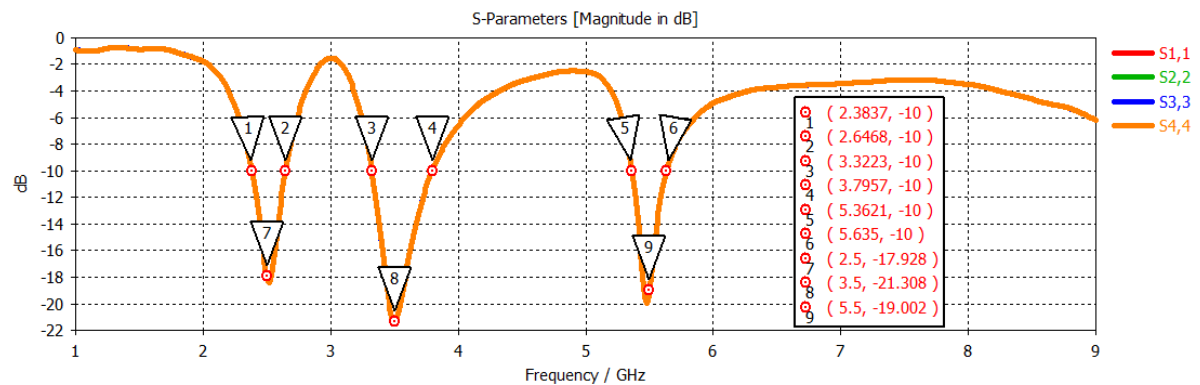


Figura 32.  $S(1,1)$ ,  $S(2,2)$ ,  $S(3,3)$  y  $S(4,4)$  coeficientes de reflexión.

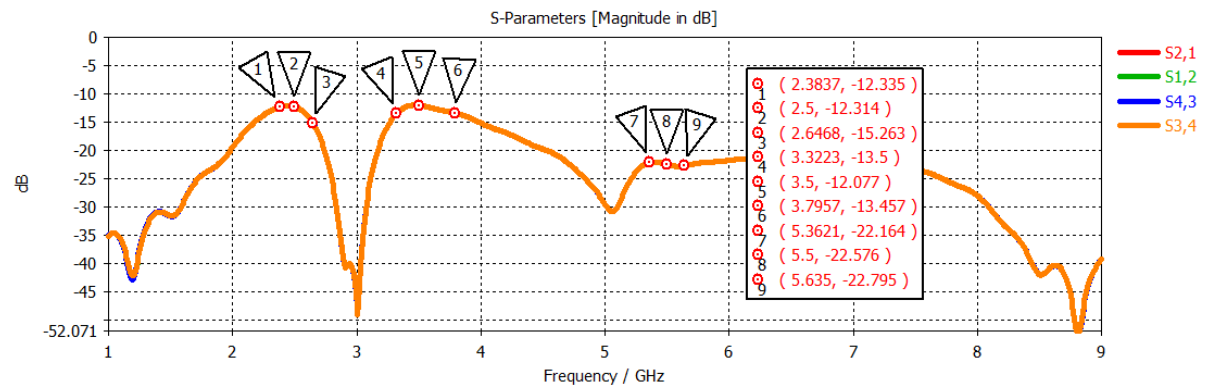


Figura 33.  $S(2,1)$ ,  $S(1,2)$ ,  $S(4,3)$  y  $S(3,4)$  coeficientes de acoplamiento.

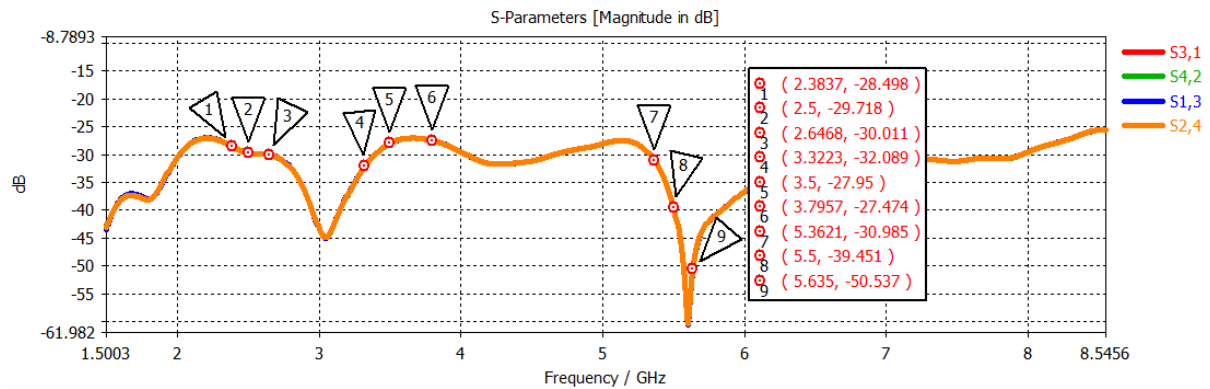


Figura 34.  $S(3,1)$ ,  $S(1,3)$ ,  $S(4,2)$  y  $S(2,4)$  coeficientes de acoplamiento.

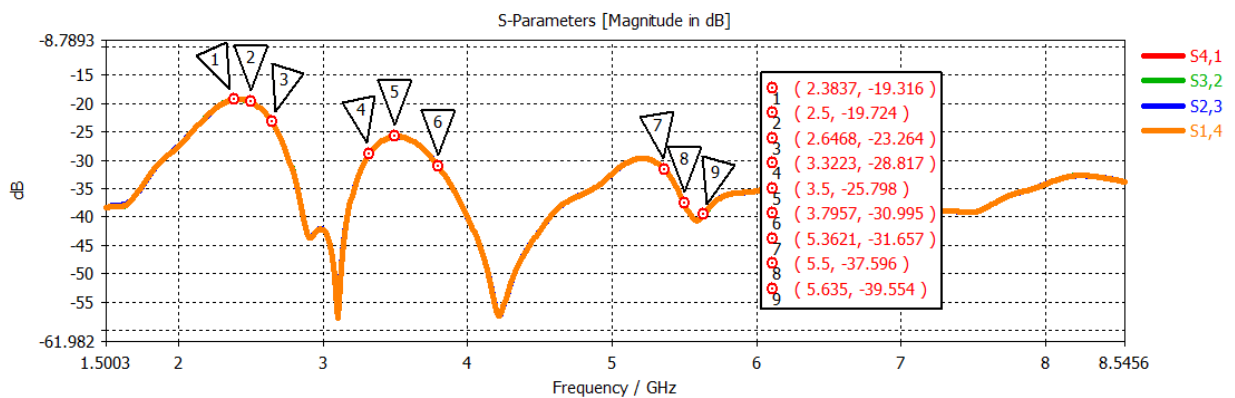
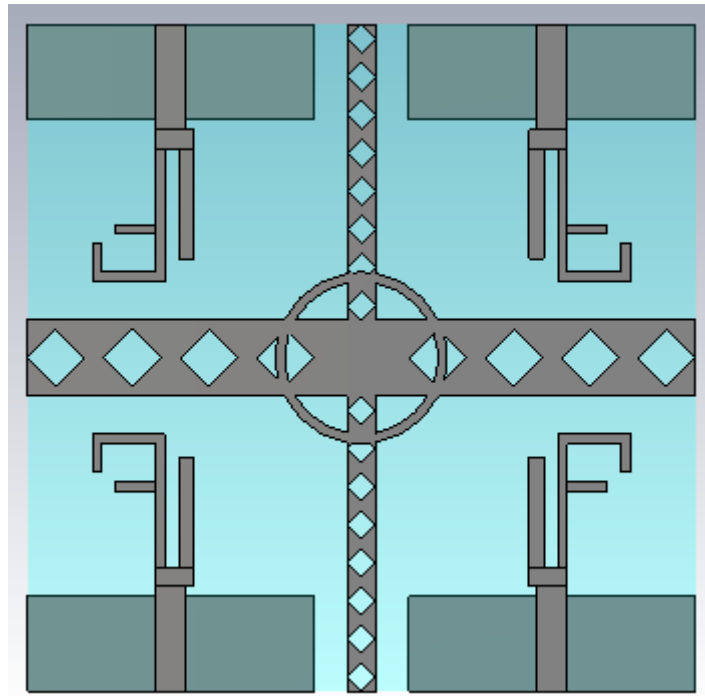


Figura 35.  $S(4,1)$ ,  $S(1,4)$ ,  $S(3,2)$  y  $S(2,3)$  coeficientes de acoplamiento.

Analizamos los resultados y observamos que cumplimos los criterios de diseño para los coeficientes de reflexión pues estamos en las bandas de trabajo por debajo de -10 dB pero no se cumplen para los coeficientes de acoplamiento debido a que las bandas de trabajo no se encuentran todas por debajo de -20 dB. Además, necesitamos que la antena sea más pequeña, por tanto, vamos a realizar este diseño con barreras metálicas.

#### 4.4.2. Antena formada por cuatro elementos con barreras

Empezamos el diseño final de la antena MIMO formada por cuatro elementos simétricos igual que en el apartado 4.3.3 con la diferencia que vamos a incluir barreras metálicas. El objetivo es el mismo que en apartado 4.3.2, reducir el tamaño final de la antena para cumplir los requisitos de diseño además de mejorar los coeficientes de acoplamiento. Al estar formada esta antena MIMO por cuatro elementos debemos colocar barreras metálicas horizontales y verticales para cumplir con lo anteriormente mencionado.



*Figura 36. Antena de cuatro elementos con barreras metálicas.*

Vamos ahora a acotar las imágenes para poder observar de mejor manera las medidas de esta nueva antena, además de poner sus valores más significativos en una tabla para una mejor comprensión.

En este diseño existen tres barreras, la horizontal es de igual anchura al sustrato con agujeros en forma de rombos separados 2 mm entre ellos de un tamaño de 6x6 mm al igual que la barrera vertical que también tiene unos agujeros en forma de rombos separados 1 mm entre ellos con una anchura y longitud de 3 mm cada uno. La tercera barrera tiene circular, de 1 mm de grosor, que pasa através de la barrera vertical y horizontal. Esto nos permite tener un buen coeficiente de adaptación entre los cuatro elementos que forman la antena MIMO además de conseguir radiar a las tres frecuencias deseadas.

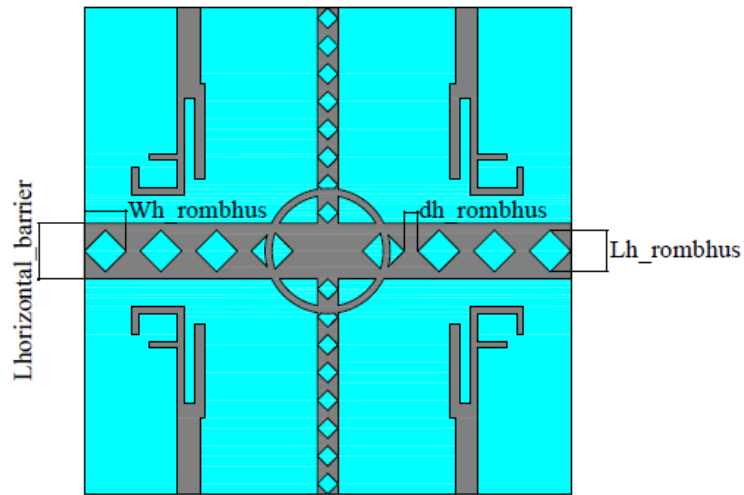


Figura 37. Antena de cuatro elementos con barreras metálicas acotada “vista frontal”.

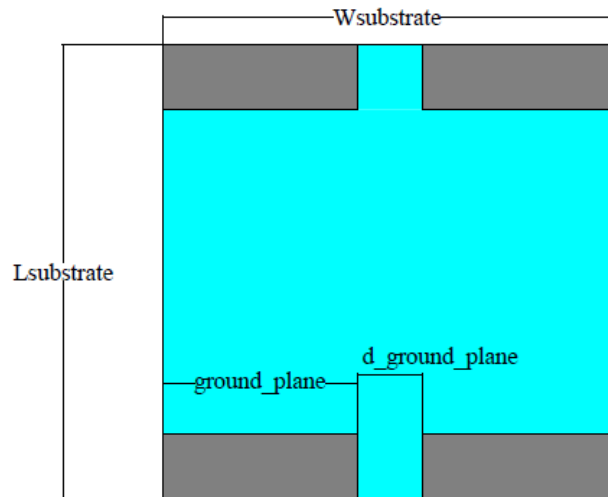


Figura 38. Antena de cuatro elementos con barreras metálicas acotada “vista posterior”.

Variable	Medida (mm)
$W_{\text{substrate}}$	70 mm
$L_{\text{substrate}}$	100 mm
$d_{\text{ground\_plane}}$	10 mm
$\text{ground\_plane}$	30 mm
$L_{\text{horizontal\_barrier}}$	8 mm
$W_{\text{horizontal\_barrier}}$	70 mm
$d_{\text{h\_rombhus}}$	2 mm
$W_{\text{h\_rombhus}}$	6 mm
$L_{\text{h\_rombhus}}$	6 mm

Tabla 7. Dimensiones de las variables de la antena de dos elementos con barreras.



Normalizamos los puertos a  $50\ \Omega$  y simulamos para obtener los siguientes parámetros S para observar los coeficientes de reflexión y los coeficientes de acoplamiento.

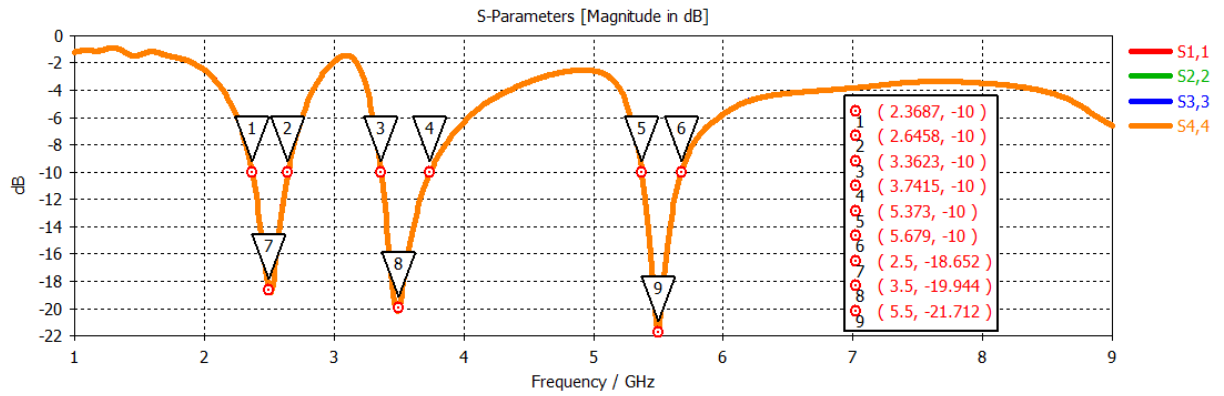


Figura 39.  $S(1,1)$ ,  $S(2,2)$ ,  $S(3,3)$  y  $S(4,4)$  coeficientes de reflexión.

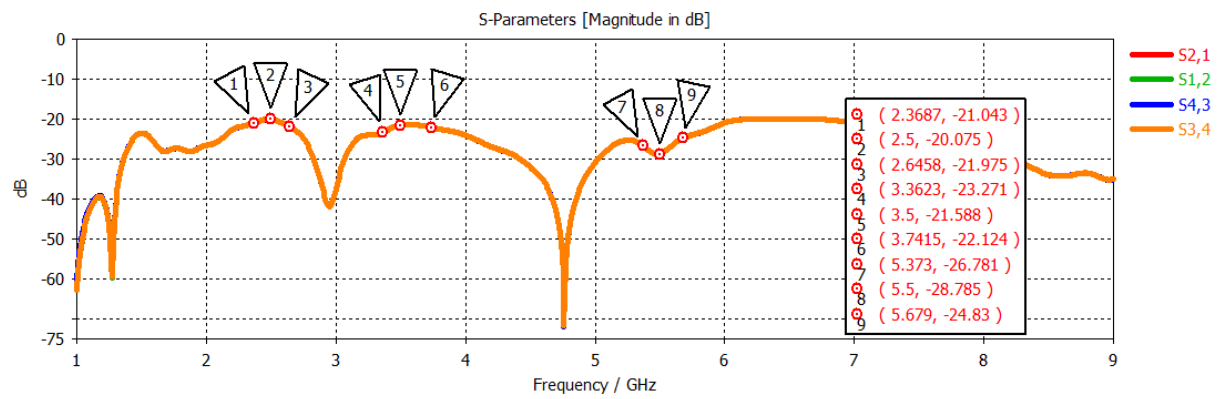


Figura 40.  $S(2,1)$ ,  $S(1,2)$ ,  $S(4,3)$  y  $S(3,4)$  coeficientes de acoplamiento.

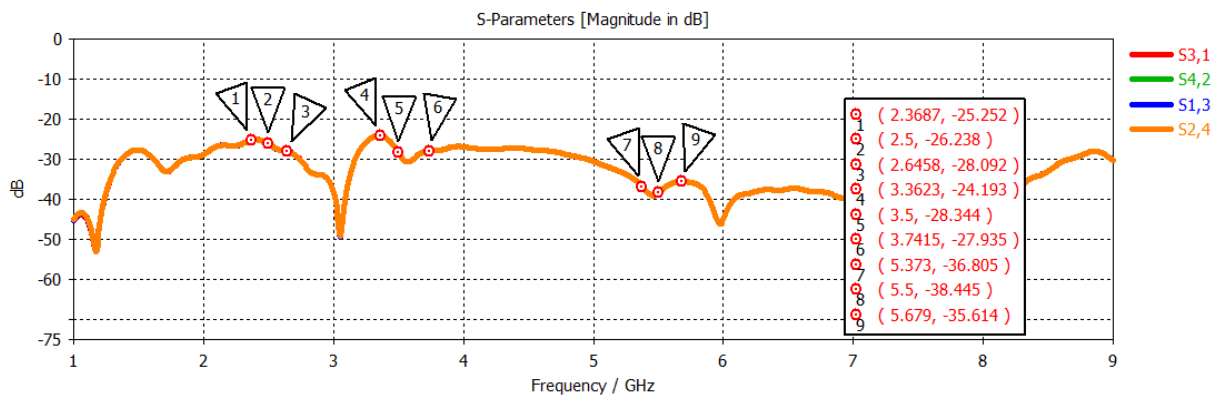
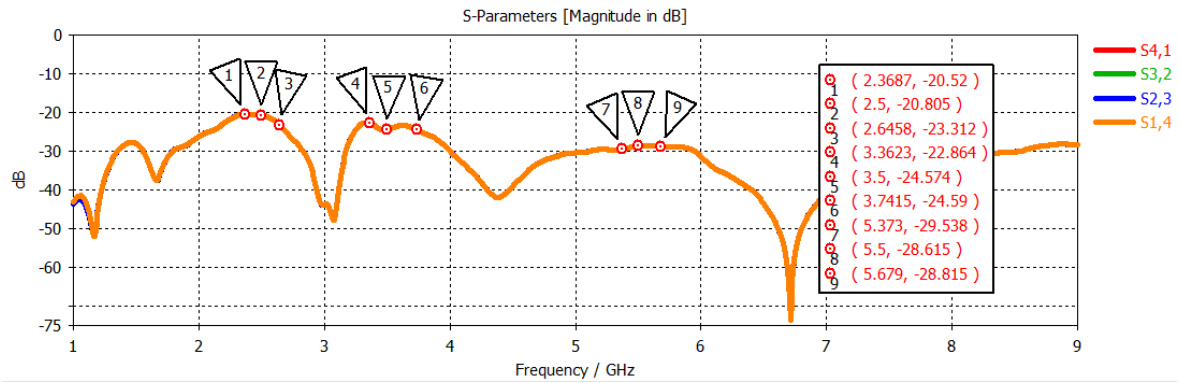


Figura 41.  $S(3,1)$ ,  $S(1,3)$ ,  $S(4,2)$  y  $S(2,4)$  coeficientes de acoplamiento.



**Figura 42.**  $S(4,1)$ ,  $S(1,4)$ ,  $S(3,2)$  y  $S(2,3)$  coeficientes de acoplamiento.

Analizamos estos resultados y podemos observar que para los coeficientes de reflexión  $S(1,1)$ ,  $S(2,2)$ ,  $S(3,3)$  y  $S(4,4)$  se encuentran por debajo de -10 dB en todas las bandas de trabajo. Ahora analizamos los coeficientes de acoplamiento y observamos que para las bandas deseadas se encuentran todas por debajo de -20 dB obteniendo así, gracias a las barreras metálicas, unos buenos resultados de reflexión y de acoplamiento además de haber podido reducir el tamaño de la antena.

## 5. Resultados prácticos: construcción y medida de las antenas

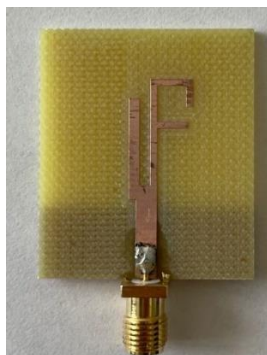
### 5.1. Construcción de las antenas

En este apartado vamos a explicar cómo ha sido el proceso de fabricación de las distintas antenas diseñadas mediante el software CST STUDIO. Para empezar, necesitamos los archivos gerber de las antenas para obtener así sus medidas. Para ello, exportamos dichos archivos desde CST STUDIO, y a continuación los abrimos desde el programa ADS Design Tool para poder generar correctamente las distintas capas que forman las antenas. Para su fabricación se utiliza la máquina de fresado de circuitos impresos LPKF ProtoMat S100, perteneciente a la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid.



*Figura 43. Máquina de fresado de circuitos impresos.*

- Antena formada por un elemento.

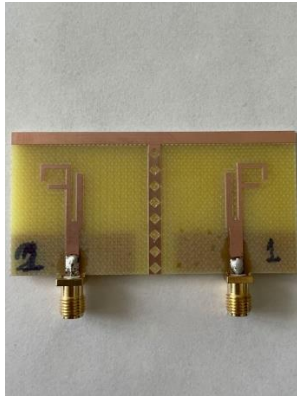


*Figura 44. Antena de un elemento vista frontal.*

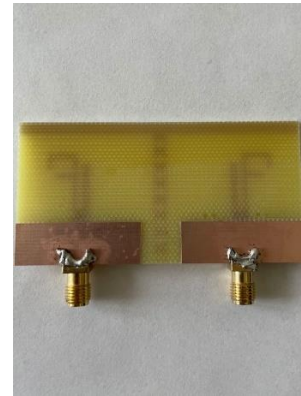


*Figura 45. Antena de un elemento vista posterior.*

- **Antena MIMO formada por dos elementos con barrera.**

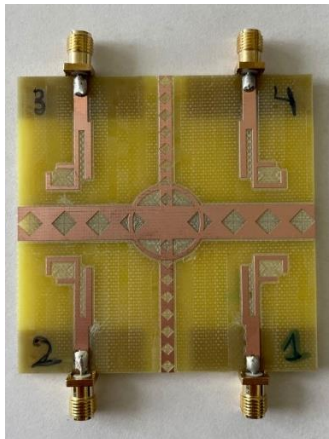


*Figura 46. MIMO de dos elementos vista frontal.*

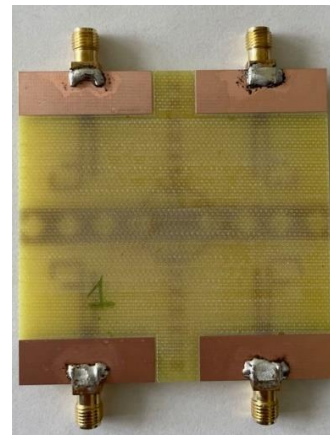


*Figura 47. MIMO de dos elementos vista posterior.*

- **Antena MIMO formada por cuatro elementos con barrera.**



*Figura 48. MIMO de cuatro elementos vista frontal.*



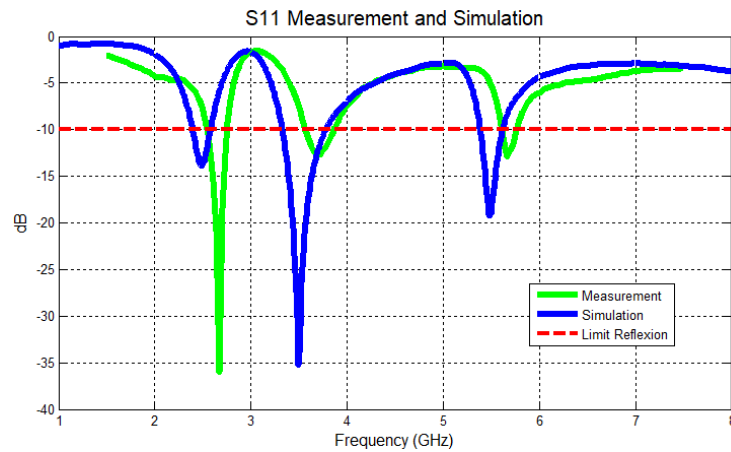
*Figura 49. MIMO de cuatro elementos vista posterior.*

## **5.2. Medida de las antenas**

Para la medida de las antenas necesitamos soldar a la fuente de alimentación, en nuestro caso la línea microstrip de cada puerto de los elementos que componen la antena, conectores SMA. Después, hacemos uso del analizador de redes que proporciona la EPS, pues está preparado para configuraciones de dos o cuatro puertos, además que cubre nuestro rango de frecuencias de 1 GHz a 8 GHz. Cabe recalcar, que antes de poder hacer las medidas es necesario calibrar el analizador mediante el Kit de Calibración.

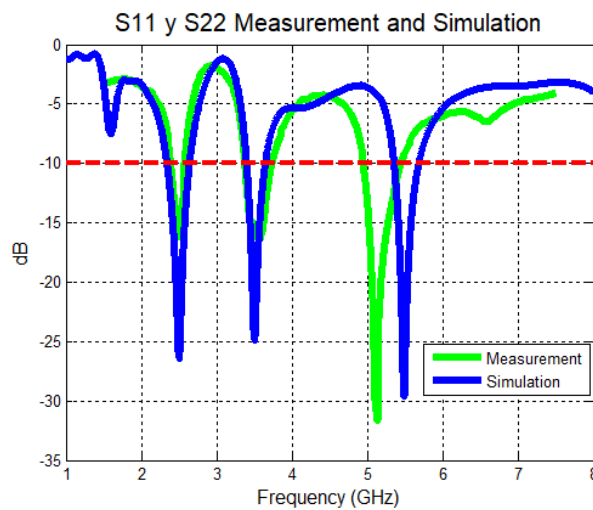
Una vez obtenidos los resultados, los guardamos y exportamos al programa MATLAB para poder visualizar los datos del analizador de las distintas antenas.

- **Parámetros S antena de un elemento.**

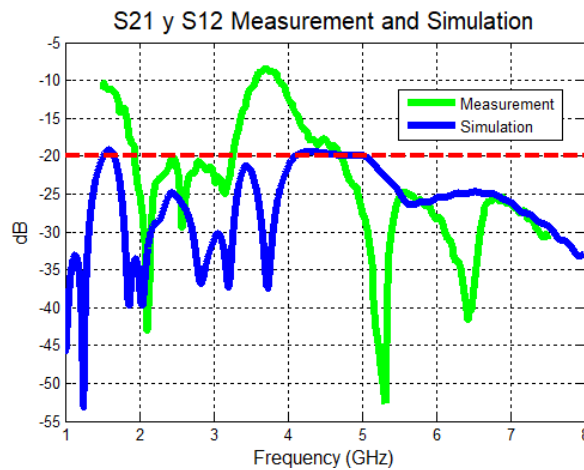


*Figura 50. Coeficiente de reflexión  $S_{11}$  antena de un elemento, medida práctica y teórica.*

- **Parámetros S antena MIMO de dos elementos con barrera.**

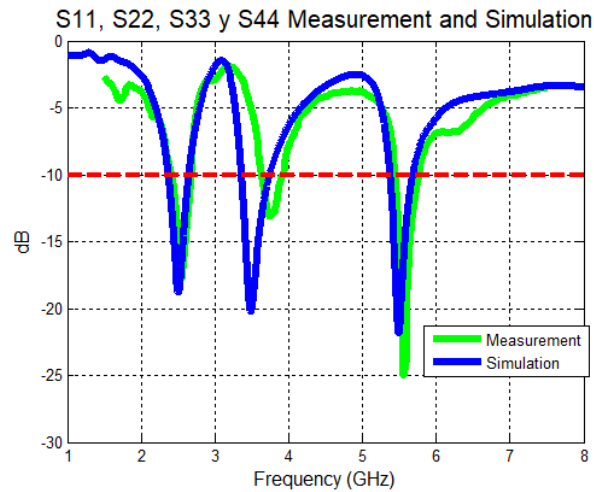


*Figura 51. Coeficientes de reflexión  $S_{11}$  y  $S_{22}$  antena de dos elementos, medida práctica y teórica.*

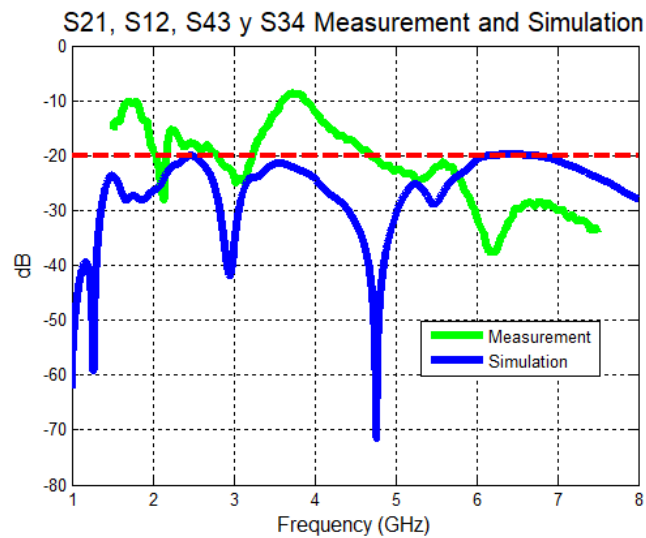


*Figura 52. Coeficientes de acoplamiento  $S_{12}$  y  $S_{21}$  antena de dos elementos, medida práctica y teórica.*

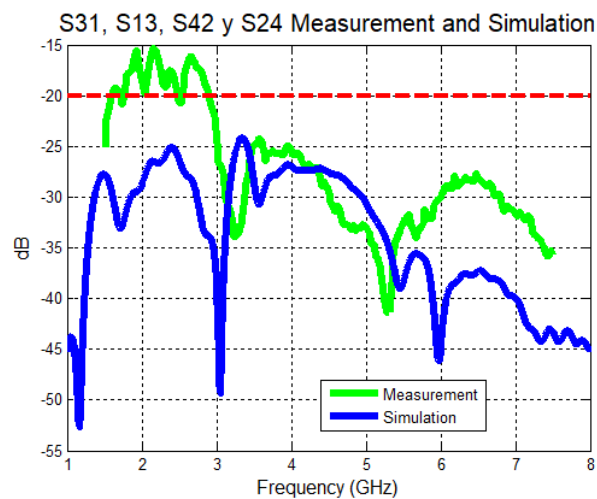
- **Parámetros S antena MIMO de cuatro elementos con barrera.**



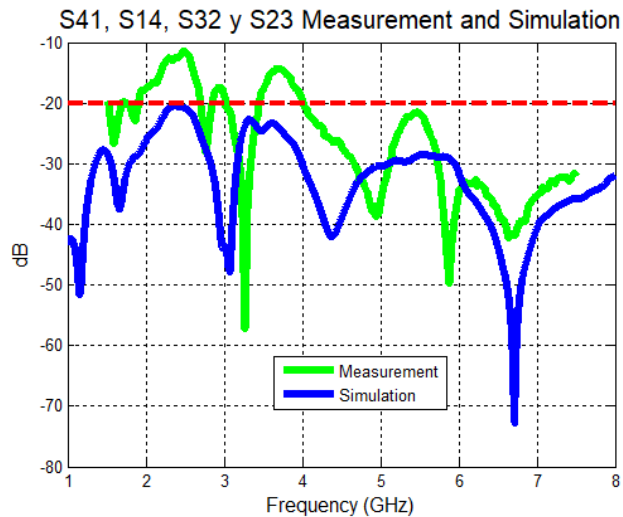
*Figura 53. Coeficientes de reflexión  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{33}$  y  $S_{44}$  antena de cuatro elementos, medida práctica y teórica.*



*Figura 54. Coeficientes de acoplamiento  $S_{21}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{43}$  y  $S_{34}$  antena de cuatro elementos, medida práctica y teórica.*



*Figura 55. Coeficientes de acoplamiento  $S_{31}$ ,  $S_{13}$ ,  $S_{42}$  y  $S_{24}$  antena de cuatro elementos, medida práctica y teórica.*



*Figura 56. Coeficientes de acoplamiento  $S_{41}$ ,  $S_{14}$ ,  $S_{32}$  y  $S_{23}$  antena de cuatro elementos, medida práctica y teórica.*

Vamos a hacer un breve análisis observando las gráficas comparativas de los parámetros S medidos por el analizador de redes y los medidos teóricamente por CST STUDIO. Observamos que para los coeficientes de reflexión las medidas, teóricas y prácticas, son muy similares, aunque se aprecia un ligero desplazamiento por parte de las medidas con el analizador, hacia unas frecuencias más altas.

Por otro lado, los coeficientes de acoplamiento están peor que en las simulaciones de CST, esto puede deberse a una mala soldadura del conector SMA con la fuente de alimentación, a errores en la propia fabricación de las antenas o errores en la calibración del analizador entre otras cosas.

## 6. Conclusiones y trabajo futuro

### 6.1. Conclusiones

Las antenas diseñadas en este trabajo de fin de grado son útiles para trabajar con la tecnología WiMAX, Wi-Fi y comunicaciones 5G, para ello se ha realizado el estudio, diseño, construcción y medida de diferentes antenas MIMO, partiendo como base de una antena formada por un solo elemento para dar lugar a antenas MIMO de dos y cuatro elementos, con y sin barreras metálicas, para poder así cumplir con las especificaciones en el criterio de diseño.

Como conclusión en las medidas de las antenas físicas, tenemos que los resultados son en algunos casos distintos de los diseñados teóricamente. Las antenas funcionan en el rango de frecuencias que se especificó en los criterios de diseño, aunque en la práctica no radien exactamente a las frecuencias de resonancia de las distintas bandas, esta radiación si se encuentra dentro del ancho de banda de las especificaciones, por tanto, las antenas si cumplen los objetivos para poder trabajar con Wi-Fi, WiMAX y comunicaciones 5G.

En cuanto al acoplamiento, se especificó que mejor sería si en las bandas de trabajo los coeficientes se encuentran por debajo o igual a -20 dB, claramente se aprecia que estos resultados son distintos y esto puede estar ocasionado por:

- **Conector SMA.** Una mala soldadura del conector puede ocasionar malas medidas con el analizador de redes debido a pérdidas de potencia además de una alteración de las reflexiones de la señal.
- **Fabricación de las antenas.** Los elementos utilizados en la fabricación pueden añadir pérdidas al diseño debidas a errores en el fresado o en la utilización del sustrato con características peores al diseñado.
- **Diseño de las antenas.** En el diseño los acoplamientos entre elementos se encuentran cumpliendo con los requisitos muy al límite, es decir, no en todas las bandas los coeficientes de acoplamiento tienen un gran margen. En algunos casos estos se encuentran en justo -20 dB.
- **Analizador de redes.** Es necesaria una correcta calibración del analizador para eliminar señales parásitas y efectos no deseados que pueden generar los cables y conectores en la medición. Por tanto, es de gran importancia la realización correcta de calibración para obtener unas medidas sin ruidos añadidos.

Concluyo este análisis de las posibles causas de las antenas medidas resaltando las más importantes y probables. Cabe resaltar que todas las antenas diseñadas en este TFG cumplen con el objetivo de trabajar en multibanda de WLAN y WiMAX.



## **6.2. Trabajo futuro**

En este trabajo se han realizado antenas que trabajan en tres bandas con tres frecuencias de resonancia, como continuación de este trabajo se podrán realizar algunas modificaciones, tales como:

- Diseño de antenas que trabajen en más de tres bandas distintas.
- Utilizar una red de alimentación distinta, como puede ser la alimentación por proximidad o la alimentación por ranura.
- Hacer uso de otra tecnología distinta a la microstrip.
- Aumento del tamaño de las antenas MIMO, es decir, trabajar con antenas formadas por más de cuatro elementos para conseguir una mejor eficiencia y utilidad de las distintas antenas MIMO.

## 7. Referencias

- [1] *Constantine A. Balanis. Antenna Theory: Analysis and Design 4<sup>a</sup> Edition. 2015*
- [2] *Jaume Anguera y Antonio Pérez. Teoría de Antenas. 2008*
- [3] *IEEE Standard #145 Definitions of Terms for Antennas. 1969*
- [4] *Masa Campos, Jose Luis. Documentación de la asignatura de cuarto curso Antenas y Compatibilidad Electromagnética. 2018-2019*
- [5] *A.Cardama, L.Jofre, J.M.Rius, J.Romeu, S.Blanch, “Antenas”, Edicions UPC. 2002*
- [6] *Ruiz Campos, Jorge. Documentación de la asignatura de tercer curso Medios de Transmisión. 2016-2017*
- [7] *David M. Pozar. Microstrip Antennas. 1992*
- [8] *Ramírez, Carlos. Antenas microstrip. 2020*
- [9] *Eldad Perahia, Robert Stacey. Next Generation Wireless LANs. 2013*
- [10] *Clint Smith and Daniel Collins. Wireless Networks. 2014*

## 8. Anexos

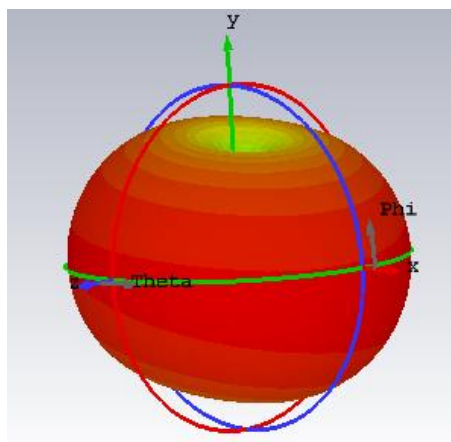
### 8.1. Diagramas de radiación

Para un mejor análisis de la antena, vamos a analizar estos diagramas, que son la representación gráfica de la variación de la intensidad de campo eléctrico, ganancia o potencia respecto a la posición que se encuentra la antena.

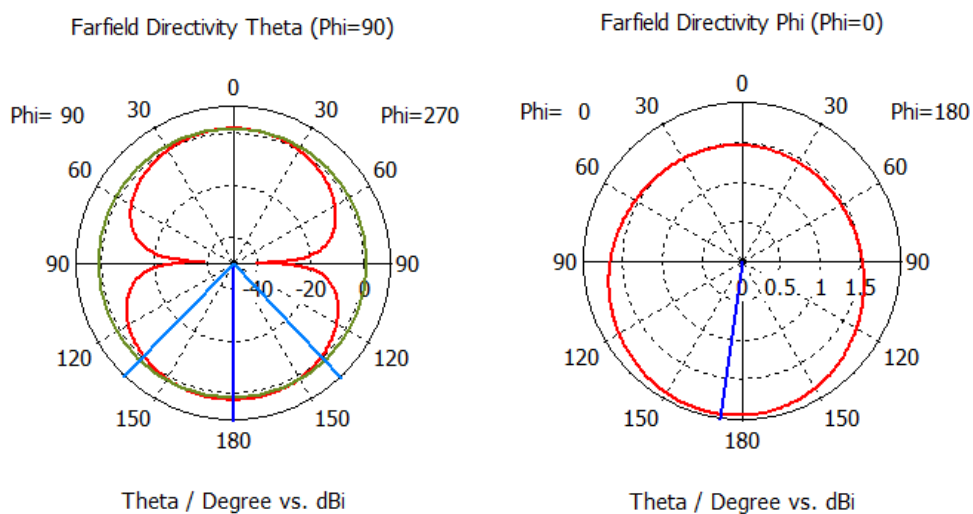
En este apartado se van a representar los diagramas en tres dimensiones y en dos dimensiones, además de poder extraer los parámetros más relevantes en una tabla.

Esto nos va a permitir analizar la directividad, las distintas ganancias y eficiencias que tiene la antena, además de los parámetros como la magnitud y dirección del lóbulo principal, lóbulos laterales y el ancho de haz que posee.

#### 8.1.1. Diagramas de radiación para antena de un elemento



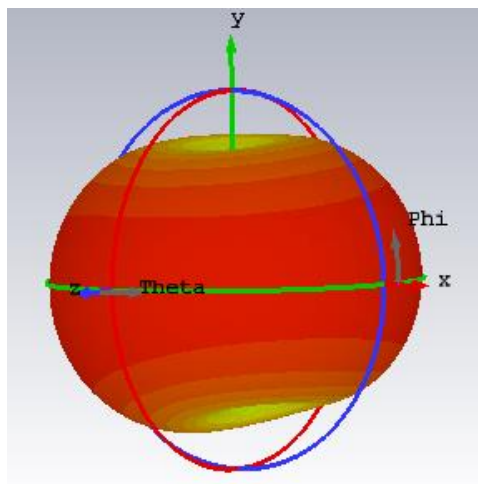
*Figura 57. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de un elemento a 2.5 GHz.*



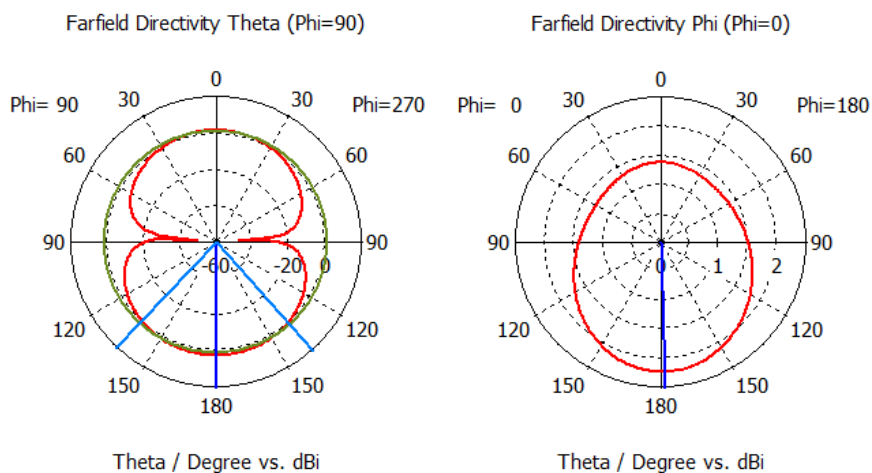
*Figura 58. Representación polar de diagrama de radiación para antena de un elemento a 2.5 GHz. Planos E y H respectivamente.*

Parámetros	Magnitud
Frecuencia	2.5 GHz
Lóbulo principal	2.16 dBi
Lóbulo lateral	-0.5 dB
Ancho de haz ( $\Delta\theta_{-3dB}$ )	89.6°
Eficiencia de radiación	-0.6342 dB
Eficiencia total	-0.8057 dB
Directividad	2.169 dBi
Ganancia	1.535 dB
Ganancia realizada	1.363 dB

*Tabla 8. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 2.5 GHz antena de un elemento.*



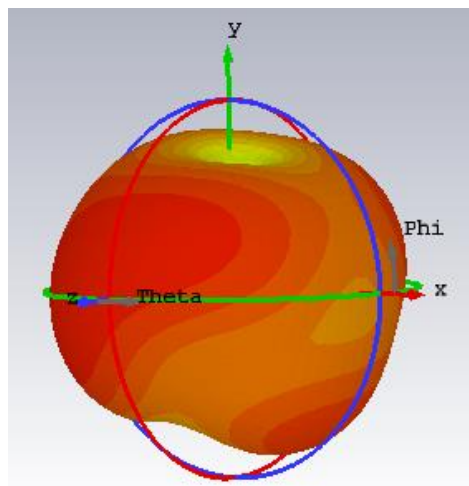
*Figura 59. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de un elemento a 3.5 GHz.*



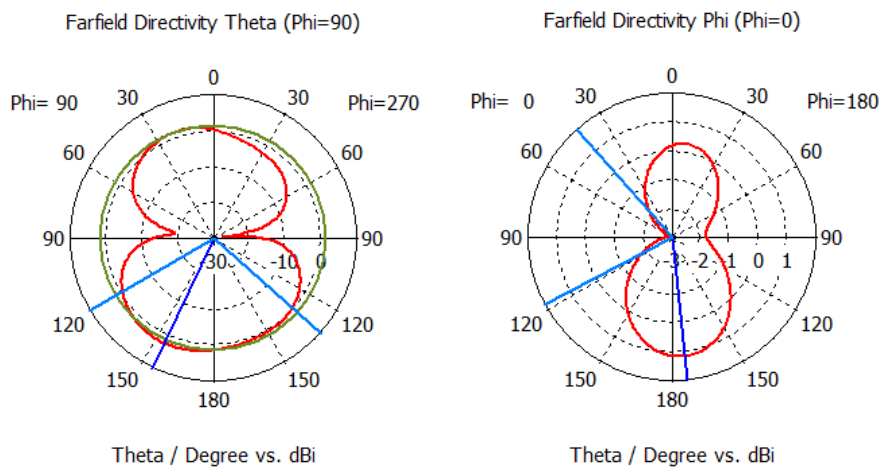
*Figura 60. Representación polar de diagrama de radiación para antena de un elemento a 3.5 GHz. Planos E y H respectivamente.*

Parámetros	Magnitud
Frecuencia	3.5 GHz
Lóbulo principal	2.43 dBi
Lóbulo lateral	-0.9 dB
Ancho de haz ( $\Delta\theta_{-3dB}$ )	88.5°
Eficiencia de radiación	-0.7009 dB
Eficiencia total	-0.7017 dB
Directividad	2.446 dBi
Ganancia	1.745 dB
Ganancia realizada	1.744 dB

*Tabla 9. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 3.5 GHz antena de un elemento.*



*Figura 61. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de un elemento a 5.5 GHz.*



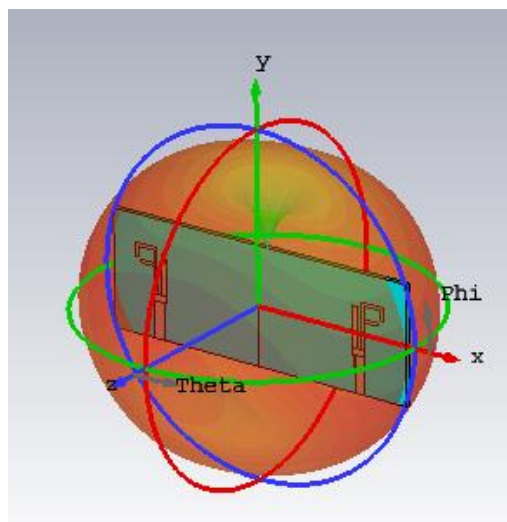
*Figura 62. Representación polar de diagrama de radiación para antena de un elemento a 5.5 GHz. Planos E y H respectivamente.*

Parámetros	Magnitud
Frecuencia	5.5 GHz
Lóbulo principal	3.11 dBi
Lóbulo lateral	-0.7 dB
Ancho de haz ( $\Delta\theta_{-3dB}$ )	99.1°
Eficiencia de radiación	-2.180 dB
Eficiencia total	-2.244 dB
Directividad	3.113 dBi
Ganancia	0.9338 dB
Ganancia realizada	0.8694 dB

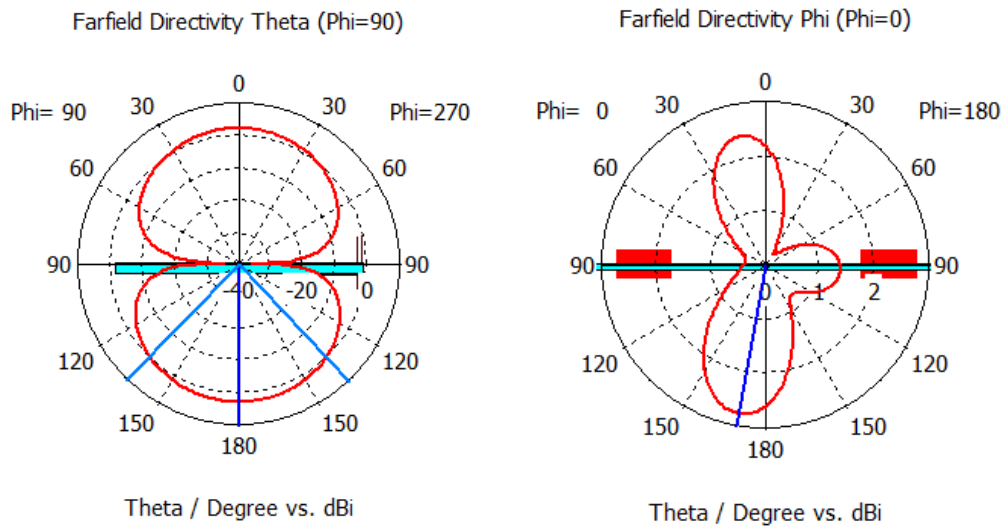
*Tabla 10. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 5.5 GHz antena de un elemento.*

### 8.1.2. Diagramas de radiación antena de dos elementos sin barreras

La antena está formada por dos antenas simétricas con un puerto cada una, para este análisis vamos a centrarnos sólo en uno de los puertos debido a que los resultados del otro puerto serán iguales por la simetría de la antena.



*Figura 63. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de dos elementos sin barrera a 2.5 GHz*



**Figura 64.** Representación polar de diagrama de radiación para antena de dos elementos sin barrea a 2.5 GHz. Planos E y H respectivamente.

Parámetros	Magnitud
Frecuencia	2.5 GHz
Lóbulo principal	2.87 dBi
Dirección lóbulo principal	180°
Ancho de haz ( $\Delta\theta_{-3dB}$ )	90.30°
Eficiencia de radiación	-0.6513 dB
Eficiencia total	-0.9704 dB
Directividad	2.971 dBi
Ganancia	2.320 dB
Ganancia realizada	2.001 dB

**Tabla 11.** Representación parámetros de radiación para frecuencia de 2.5 GHz antena de dos elementos sin barrera.

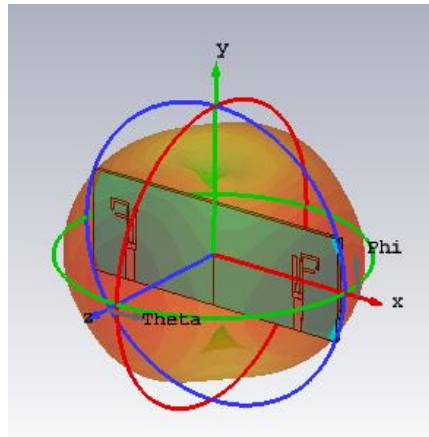


Figura 65. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de dos elementos sin barrera a 3.5 GHz

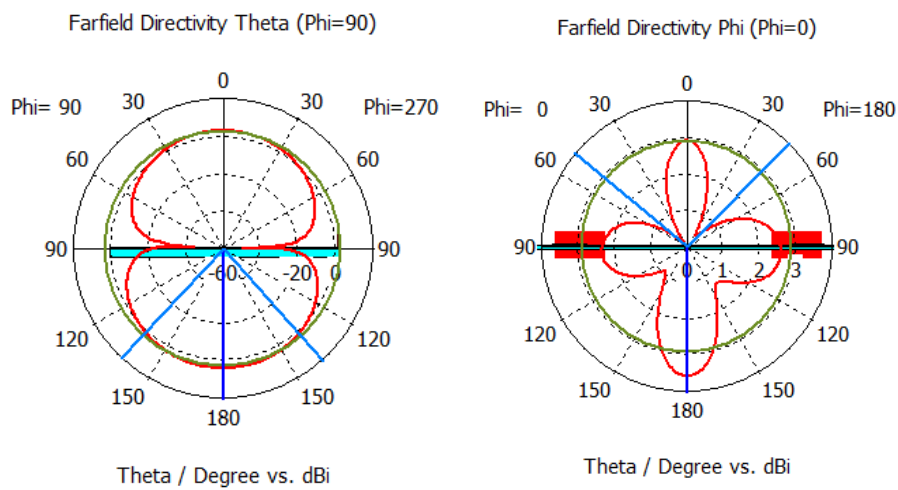
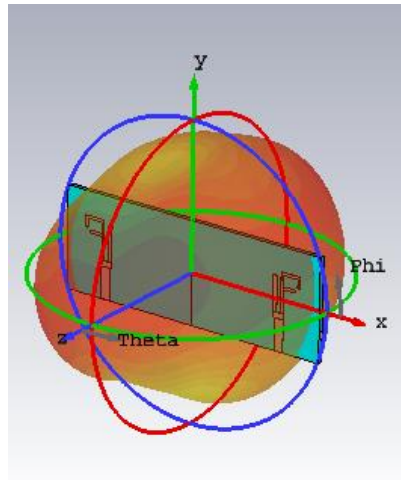


Figura 66. Representación polar de diagrama de radiación para antena de dos elementos sin barrera a 3.5 GHz. Planos E y H respectivamente.

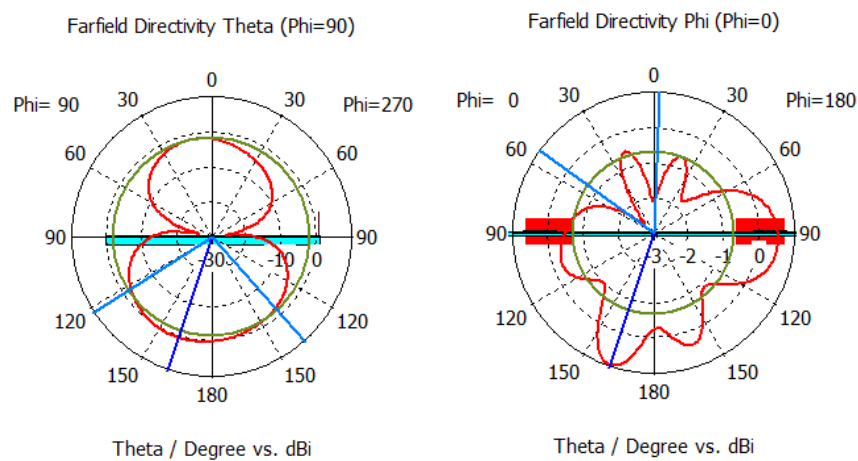
Parámetros	Magnitud
Frecuencia	3.5 GHz
Lóbulo principal	2.6 dBi
Dirección lóbulo principal	180°
Ancho de haz ( $\Delta\theta_{-3dB}$ )	85.8°
Eficiencia de radiación	-0.8809 dB
Eficiencia total	-1.013 dB
Directividad	3.613 dBi
Ganancia	2.733 dB
Ganancia realizada	2.601 dB

Tabla 12. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 3.5 GHz antena de dos elementos sin barrera.





**Figura 67.** Representación 3D de diagrama de radiación para antena de dos elementos sin barrera a 5.5 GHz.



**Figura 68.** Representación polar de diagrama de radiación para antena de dos elementos sin barrera a 5.5 GHz. Planos E y H respectivamente.

Parámetros	Magnitud
Frecuencia	5.5 GHz
Lóbulo principal	3.04 dBi
Dirección lóbulo principal	165°
Ancho de haz ( $\Delta\theta_{-3dB}$ )	78.1°
Eficiencia de radiación	-0.584 dB
Eficiencia total	-1.605 dB
Directividad	3.713 dBi
Ganancia	2.129 dB
Ganancia realizada	2.108 dB

**Tabla 13.** Representación parámetros de radiación para frecuencia de 5.5 GHz antena de dos elementos sin barrera.

### 8.1.3. Diagramas de radiación antenna de dos elementos con barreras

La antenna está formada por dos antenas simétricas con un puerto cada una, para este análisis vamos a centrarnos sólo en uno de los puertos debido a que los resultados del otro puerto serán iguales por la simetría de la antenna.

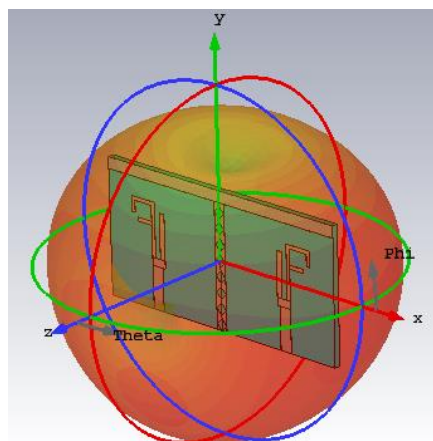


Figura 69. Representación 3D de diagrama de radiación para antenna de dos elementos con barrera a 2.5 GHz.

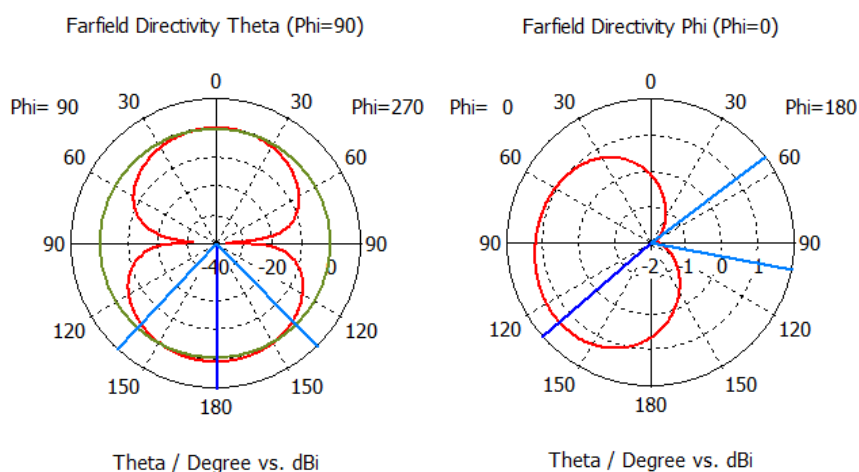
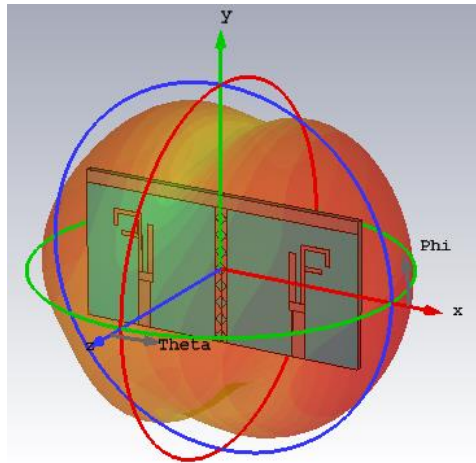


Figura 70. Representación polar de diagrama de radiación para antenna de dos elementos con barrera a 2.5 GHz. Planos E y H respectivamente.

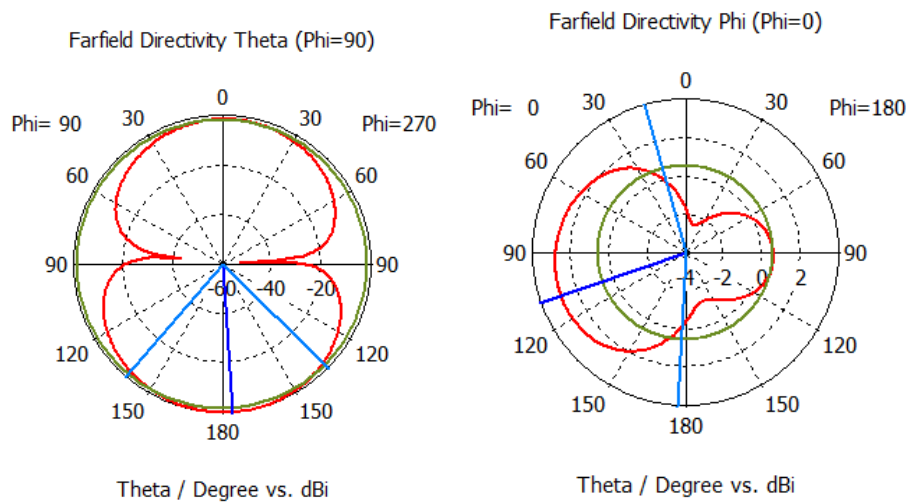
Parámetros	Magnitud
Frecuencia	2.5 GHz
Lóbulo principal	2.8 dBi
Dirección lóbulo principal	160°
Ancho de haz ( $\Delta\theta_{-3dB}$ )	239°
Eficiencia de radiación	-0.3457 dB

Eficiencia total	-0.3661 dB
Directividad	3.004 dBi
Ganancia	2.659 dB
Ganancia realizada	2.638 dB

*Tabla 14. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 2.5 GHz antena de dos elementos con barrera.*



*Figura 71. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de dos elementos con barrera a 3.5 GHz.*

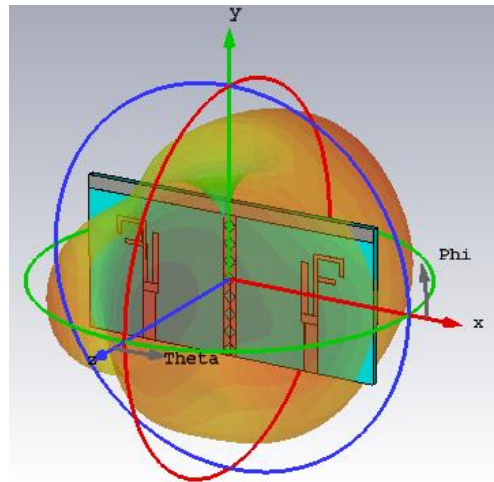


*Figura 72. Representación polar de diagrama de radiación para antena de dos elementos con barrera a 3.5 GHz. Planos E y H respectivamente.*

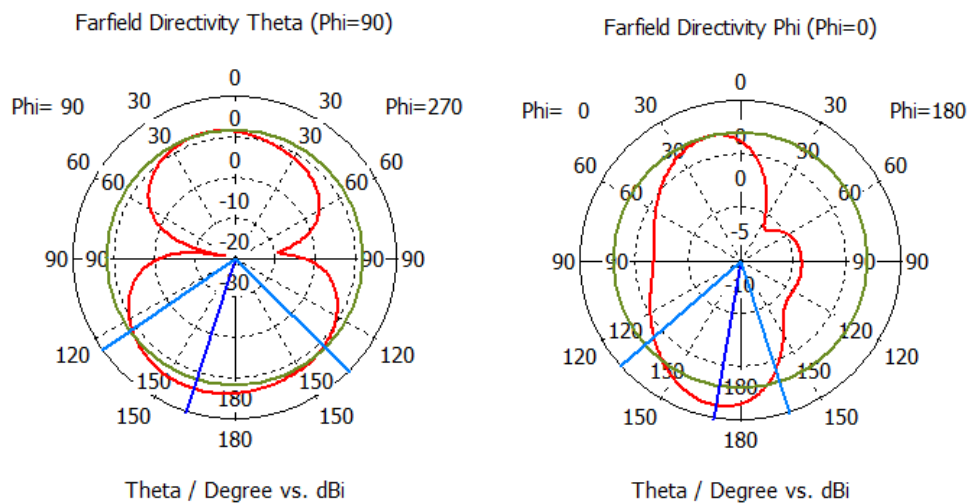
Parámetros	Magnitud
Frecuencia	3.5 GHz
Lóbulo principal	2.8 dBi
Lóbulo lateral	-0.7 dB

Ancho de haz ( $\Delta\theta_{-3dB}$ )	99.1°
Eficiencia de radiación	-0.1012 dB
Eficiencia total	-0.1062 dB
Directividad	3.257 dBi
Ganancia	2.245 dB
Ganancia realizada	2.195 dB

**Tabla 15. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 3.5 GHz antena de dos elementos con barrera.**



**Figura 73. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de dos elementos con barrera a 5.5 GHz.**

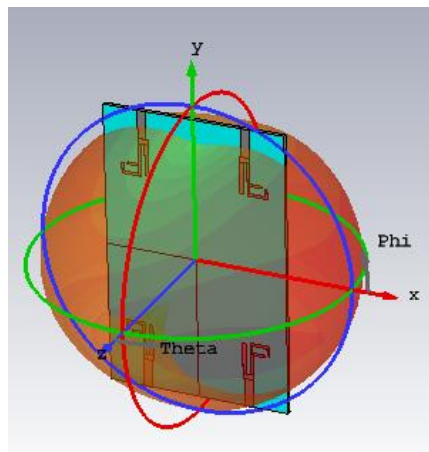


**Figura 74. Representación polar de diagrama de radiación para antena de dos elementos con barrera a 5.5 GHz. Planos E y H respectivamente.**

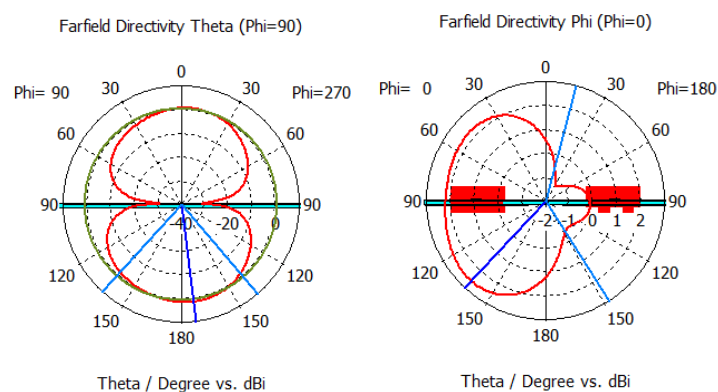
Parámetros	Magnitud
Frecuencia	5.5 GHz
Lóbulo principal	2.8 dBi
Lóbulo lateral	-0.7 dB
Ancho de haz ( $\Delta\theta_{-3dB}$ )	99.1°
Eficiencia de radiación	-0.1525 dB
Eficiencia total	-0.1545 dB
Directividad	5.674 dBi
Ganancia	4.150 dB
Ganancia realizada	4.129 dB

*Tabla 16. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 5.5 GHz antena de dos elementos con barrera.*

#### 8.1.4. Diagramas de radiación antena de cuatro elementos sin barreras



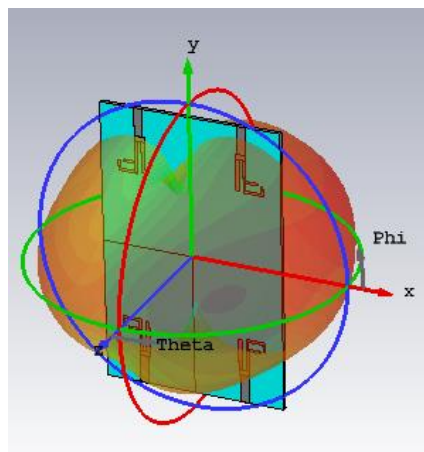
*Figura 75. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos sin barrera a 2.5 GHz.*



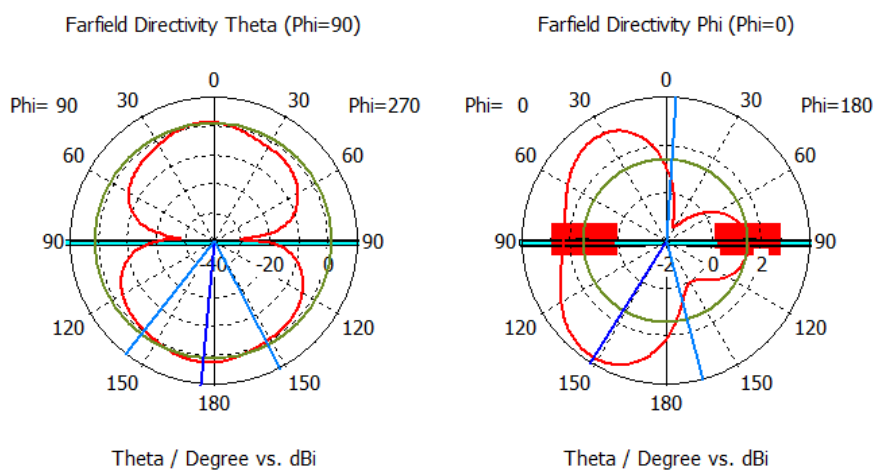
*Figura 76. Representación polar de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos sin barrera a 2.5 GHz. Planos E y H respectivamente.*

Parámetros	Magnitud
Frecuencia	2.5 GHz
Lóbulo principal	2.55 dBi
Lóbulo lateral	-0.5 dB
Ancho de haz ( $\Delta\theta_{-3dB}$ )	74.7°
Eficiencia de radiación	-0.4978 dB
Eficiencia total	-0.9223 dB
Directividad	3.054 dBi
Ganancia	2.556 dB
Ganancia realizada	2.131 dB

*Tabla 17. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 2.5 GHz antena de cuatro elementos sin barrera.*



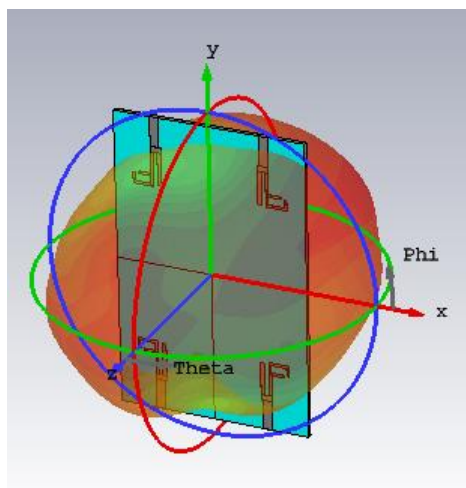
*Figura 77. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos sin barrera a 3.5 GHz.*



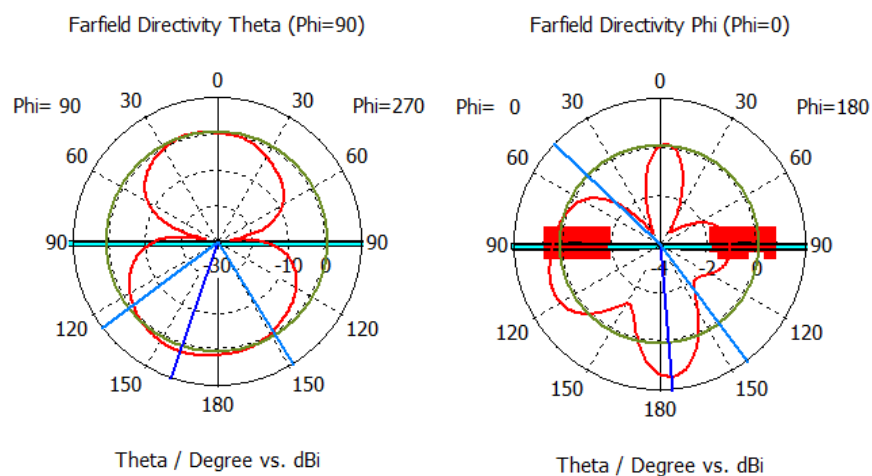
*Figura 78. Representación polar de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos sin barrera a 3.5 GHz. Planos E y H respectivamente.*

Parámetros	Magnitud
Frecuencia	3.5 GHz
Lóbulo principal	2.29 dBi
Lóbulo lateral	-0.9 dB
Ancho de haz ( $\Delta\theta_{-3dB}$ )	66.0°
Eficiencia de radiación	-0.7641 dB
Eficiencia total	-1.092 dB
Directividad	4.372 dBi
Ganancia	3.608 dB
Ganancia realizada	3.280 dB

*Tabla 18. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 3.5 GHz antena de cuatro elementos sin barrera.*



*Figura 79. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos sin barrera a 5.5 GHz.*



*Figura 80. Representación polar de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos sin barrera a 5.5 GHz. Planos E y H respectivamente.*





Parámetros	Magnitud
Frecuencia	2.5 GHz
Lóbulo principal	3.02 dBi
Lóbulo lateral	-0.5dB
Ancho de haz ( $\Delta\theta_{-3dB}$ )	84.5°
Eficiencia de radiación	-0.4679 dB
Eficiencia total	-0.6055 dB
Directividad	3.537 dBi
Ganancia	3.069 dB
Ganancia realizada	2.932 dB

Tabla 20. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 2.5 GHz antena de cuatro elementos con barrera.

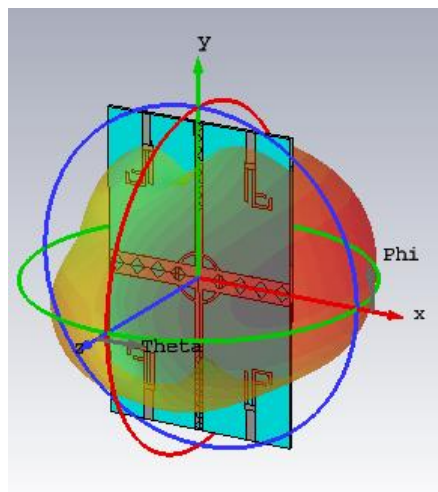


Figura 83. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos con barrera a 3.5 GHz.

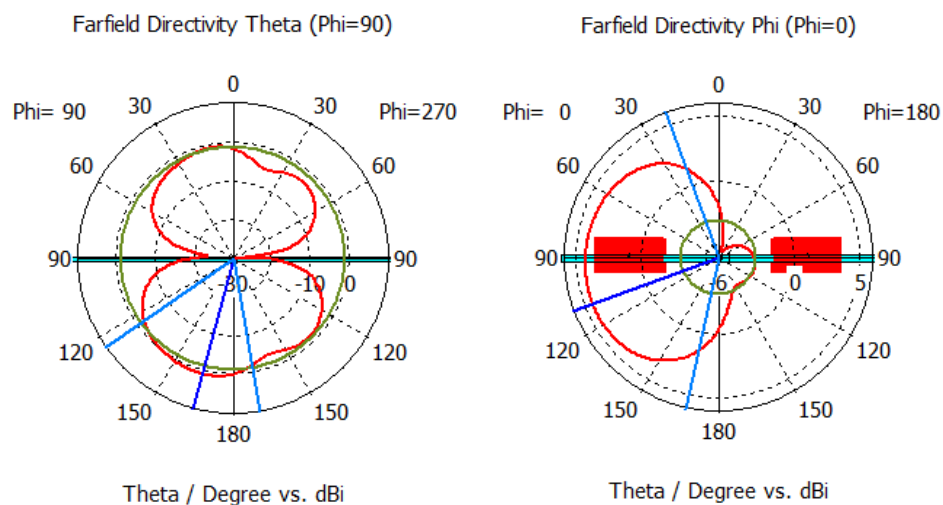
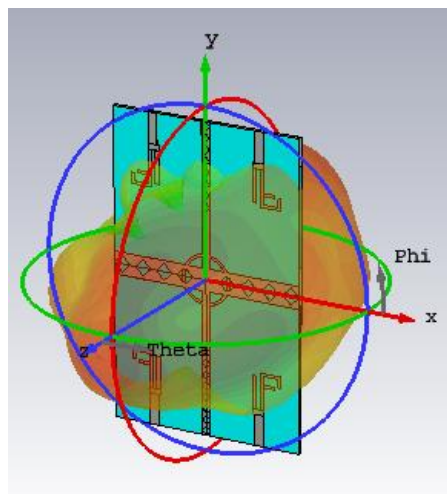


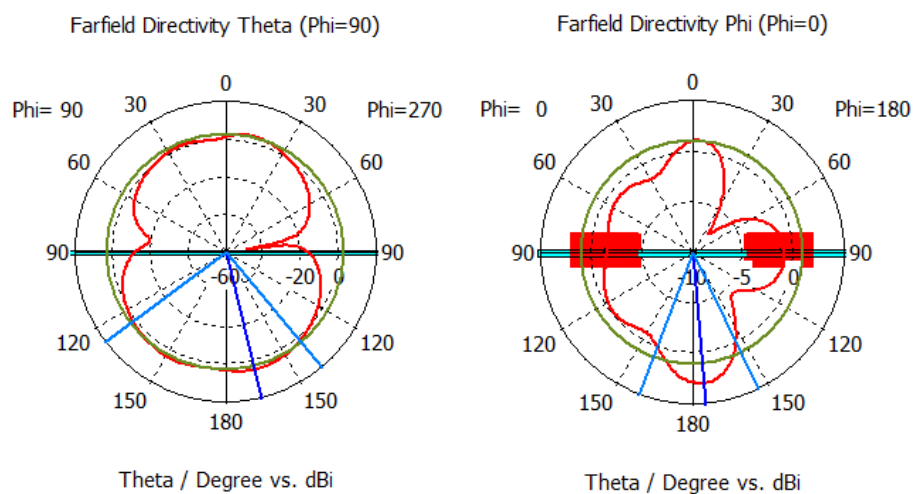
Figura 84. Representación polar de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos con barrea a 3.5 GHz. Planos E y H respectivamente.

Parámetros	Magnitud
Frecuencia	3.5 GHz
Lóbulo principal	0.776 dBi
Lóbulo lateral	-1.5 dB
Ancho de haz ( $\Delta\theta_{-3dB}$ )	68.2°
Eficiencia de radiación	-0.8629 dB
Eficiencia total	-0.9680 dB
Directividad	5.180 dBi
Ganancia	4.317 dB
Ganancia realizada	4.212 dB

*Tabla 21. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 3.5 GHz antena de cuatro elementos con barrera.*



*Figura 85. Representación 3D de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos con barrera a 5.5 GHz.*



*Figura 86. Representación polar de diagrama de radiación para antena de cuatro elementos con barrera a 5.5 GHz. Planos E y H respectivamente.*

<b>Parámetros</b>	<b>Magnitud</b>
Frecuencia	5.5 GHz
Lóbulo principal	5.71 dBi
Lóbulo lateral	-0.6 dB
Ancho de haz ( $\Delta\theta_{-3dB}$ )	76.3°
Eficiencia de radiación	-1.447 dB
Eficiencia total	-1.509 dB
Directividad	5.953 dBi
Ganancia	4.506 dB
Ganancia realizada	4.444 dB

*Tabla 22. Representación parámetros de radiación para frecuencia de 5.5 GHz antena de cuatro elementos con barrera.*